TOME II — JANVIER 1947 — N° 7

ANNALES

DE

RADIOÉLECTRICITÉ

COMPAGNIES FRANÇAISES ASSOCIÉES DE T. S. F.

COMPAGNIE GÉNÉRALE DE TÉLÉGRAPHIE SANS FIL
SOCIÉTÉ FRANÇAISE RADIO-ÉLECTRIQUE
LA RADIOTECHNIQUE
SOCIÉTÉ INDÉPENDANTE DE TÉLÉGRAPHIE SANS FIL
COMPAGNIE RADIO-FRANCE
COMPAGNIE RADIO-MARITIME
RADIO-ORIENT
COMPAGNIE RADIO CINÉMA
ÉTABLISSEMENTS E. ROBERT ET CIE (LA STÉATITE INDUSTRIELLE)
SOCIÉTÉ DE TRAITEMENTS ÉLECTROLYTIQUES ET ÉLECTROTHERMIQUES (STEL)

79, Boulevard Haussmann, PARIS

SOMMAIRE

L'envoi des *Annales* est fait contre versement de la somme de 250 francs par fascicule, ou 800 francs pour une souscription à 4 fascicules à paraître dans l'année, à titre de participation aux frais.

Prière d'adresser toute correspondance à la Compagnie Générale de T. S. F., Centre d'Information et de Documentation, 98 bis, boulevard Haussmann, Paris (8e).

Règlement par chèque à l'ordre de la Compagnie Générale de T.S.F. ou versement à son compte C. P. Paris 1068-98.

SUR LE CALCUL DES LIAISONS RADIOTÉLÉPHONIQUES MULTIPLEX EN ONDES ULTRA-COURTES (1)

PAR H. CHIREIX,

Ingénieur en chef de la Société Française Radio-Électrique.

SOMMAIRE. — *Moyennant certaines hypothèses simplificatrices, l'auteur se propose de prédéterminer le rapport signal-bruit quasi minimum d'une liaison radiotéléphonique dans la gamme de fréquences comprise entre* 100 *et* 5 000 Mc/sec.

Nous nous proposons dans cet exposé de déterminer le rapport signal-bruit *quasi minimum* que l'on peut espérer obtenir d'une liaison téléphonique multiplex effectuée sur des ondes comprises dans la gamme de fréquences s'étendant de 100 à 5 000 Mc/sec.

La première question posée est donc : quel champ peut-on espérer à l'endroit du récepteur pour une puissance d'émission donnée ?

La deuxième question est : sur quelle puissance de bruit équivalente doit-on tabler à la réception ?

Il est bien évident qu'une détermination de ce genre ne peut être qu'approximative et qu'un certain nombre d'hypothèses doivent être introduites.

Nous nous déclarerons pleinement satisfaits si l'exactitude du rapport signal à bruit se vérifie à 10 db près par exemple, et parmi les hypothèses simplificatrices nous envisageons celles-ci :

1° La liaison comporte un parcours de longueur assez voisine de la portée optique, un peu plus court que celle-ci en général, et exceptionnellement plus long;

2° La visibilité n'est pas troublée sur ce parcours par des obstacles, tels que collines ou pics, causes de diffraction importantes;

3° Il n'existe pas au voisinage du récepteur, d'obstacles susceptibles de causer des réflexions importantes, ni de sources de parasites industriels.

(1) Communication présentée le 17 juin 1946 à la *Société Française des Électriciens.*

1. Prédétermination du champ et de la puissance reçue.

Il est commode de rapporter les résultats à une antenne de référence qui est habituellement soit un dipôle de faibles dimensions vis-à-vis de la longueur d'onde, soit une antenne demi-onde très surélevée.

On sait qu'en l'absence de toute atténuation, un dipôle en présence d'un sol parfaitement conducteur et radiant 1 kW donne à grande distance un champ électrique égal à

$$\varepsilon = \frac{3.10^5}{D}\ \mu V/m,$$

expression dans laquelle D est évalué en kilomètres.

En exprimant par T l'équivalent de transmission, ceci peut s'écrire

$$T = 110 - 20 \log_{10} D \text{ db au-dessus du } \mu V.$$

Si au lieu du kilowatt on prend le watt comme unité de puissance

$$T = 80 - 20 \log_{10} D \text{ db au-dessus du } \mu V.$$

Dans le cas d'un dipôle surélevé, la réflexion sur le sol n'intervient plus, il faut alors doubler la puissance pour obtenir le même champ, on aura donc pour 1 W radié

$$T = 77 - 20 \log_{10} D \text{ db au-dessus du } \mu V.$$

Une antenne demi-onde isolée dans l'espace a évidemment un diagramme de rayonnement légèrement amélioré vis-à-vis du dipôle et, par suite,

un certain gain vis-à-vis de celui-ci, le gain en puissance est donné par le rapport

$$\frac{80}{73} \# 1,1,$$

80 Ω et 73 Ω étant respectivement les résistances calculées de radiation quand on extrapole la formule du dipôle et la valeur exacte qui tient compte de la distribution sinusoïdale du courant.

Exprimé en décibels, le gain est inférieur à 0,5 db; nous sommes donc en mesure de négliger cette différence et nous écrirons par suite que l'antenne de référence radiant 1 W donne un équivalent de transmission

$$(1) \qquad T = 77 - 20 \log_{10} D \text{ db au-dessus du } \mu\text{V}.$$

Cette relation exprime la « loi de l'inverse distance ».

En fait l'émission comme la réception se font sur des aériens directifs donnant un maximum d'effet suivant un demi-axe. Ces aériens peuvent être conçus suivant des principes bien différents. Ils peuvent par exemple être constitués par des rideaux plans d'antennes-métalliques dans la partie de la gamme correspondant aux ondes les plus longues, ou bien encore par des rideaux plans d'antennes diélectriques constituées par des fentes ou bien encore par des cornets débouchant à l'extrémité de guides, où bien encore par des réflecteurs paraboliques, cylindriques, etc.

Quelles que soient les formes de réalisations adoptées, le gain de l'aérien utilisé est proportionnel à la surface (exprimée en prenant comme unité la longueur d'onde) de l'aérien ou de son ouverture parallèle au front de l'onde et l'expression *approximative* du gain vis-à-vis de l'antenne de référence est

$$(2) \qquad \mathcal{G} = 10 \log_{10} \frac{S}{\lambda^2} + 6 \text{ db}.$$

Ce gain est par conséquent à ajouter à la formule (1), pour avoir le champ réel correspondant à la loi de l'inverse distance.

De la même manière la réception se faisant sur un aérien directif, on pourra considérer la réception se faisant sur l'aérien de référence, le champ reçu équivalent étant le champ réel au récepteur majoré du gain exprimé par la relation (2).

Par ailleurs la puissance reçue sur une antenne demi-onde isolée dans l'espace, débitant en court-circuit (et par suite rayonnant cette même puissance), est égale à

$$(3) \qquad W = \left(\frac{\varepsilon\lambda}{\pi}\right)^2 \frac{10^{-12}}{75} = 1,33\,\varepsilon^2\lambda^2\, 10^{-15} \text{ W},$$

expression dans laquelle 75 Ω est la résistance de radiation de l'antenne demi-onde et où ε est exprimé en microvolts par mètre.

On peut évaluer aussi la puissance reçue au moyen du flux du vecteur de Poynting à travers une surface équivalente à l'antenne demi-onde.

On trouve alors

$$W = 2,66\,\varepsilon^2 S_1\, 10^{-15} \text{ W},$$

S_1 étant exprimé en mètres carrés.

Le rapprochement des deux relations montre que

$$(4) \qquad S_1 = \frac{\lambda^2}{2},$$

autrement dit la surface équivalente d'une antenne demi-onde est $\frac{\lambda^2}{2}$. Par ailleurs au maximum d'adaptation le quart de cette puissance peut être recueillie.

Il devient alors indifférent de passer pour la réception par l'intermédiaire de l'antenne équivalente et du gain de l'aérien récepteur ou de considérer uniquement le champ réel et la surface réelle de l'aérien récepteur S.

Il y a lieu cependant de considérer dans ce dernier cas que l'aérien étant supposé avoir une direction privilégiée seulement suivant un demi-axe, autrement dit étant supposé ne pas recevoir de la direction diamétralement opposée, l'énergie est doublée de sorte qu'elle s'écrit

$$(5) \qquad W = 5,33\,\varepsilon^2 S\, 10^{-15} \text{ W}.$$

On voit alors effectivement que l'on passe de la relation (3) à la relation (5) au moyen de la relation (2), la relation (2) correspondant à un gain en puissance de $\frac{4S}{\lambda^2}$.

A titre d'exemple d'application de ces formules nous voyons que pour l'onde de 10 cm, un aérien de 1 m² d'ouverture donne un gain de 26 db, et qu'à un champ réel dans l'éther de 1 mV/m correspond pour un aérien de 1 m² d'ouverture une puissance de 5,33 10^{-9} W dont le quart au maximum d'adaptation peut être récupéré comme énergie utile.

Le problème le plus important est maintenant de déterminer l'affaiblissement supplémentaire vis-à-vis de la loi de l'inverse distance exprimée par la relation (1).

L'étude de la diffraction des ondes électromagnétiques autour de la terre sphérique a fait depuis Sommerfeld l'objet de nombreux travaux et en particulier de la part de G. N. Watson, de T. L. Eckersley et de Van der Pol et Bermmer.

T. L. Eckersley en particulier a donné, en mars 1937 à l'Institute of Electrical Engineers, une communication tout à fait remarquable accompagnée de nombreux abaques et permettant le calcul rapide des liaisons entre 2 et 10 m de longueur d'onde (fréquence entre 30 et 150 Mc).

Van der Pol et Bremmer, dans une autre série non moins remarquable de communications parues dans le *Philosophical Magazine* (juillet 1937, novembre 1937, juin 1938), ont repris complètement le problème et donné des résultats même pour des ondes beaucoup plus courtes. C'est plus spécialement à ce travail que nous nous sommes référés et en fait nous ne faisons que présenter sous une forme pratique, les résultats obtenus par ces auteurs. Nous avons pu vérifier du reste que les résultats obtenus par Van der Pol concordent d'une manière satisfaisante avec ceux de T. L. Eckersley et les nôtres.

Rappelons d'abord que dans les travaux précités les auteurs considèrent la terre comme un semi-conducteur ayant une conductibilité donnée et une constante diélectrique données et, d'autre part, le milieu extérieur comme un milieu ayant une conductibilité nulle et une constante diélectrique égale à 1. Ceci exclut donc *a priori* l'effet sur la propagation dû aux conditions atmosphériques (inversions de température, brouillard, pluie, etc.).

On peut néanmoins tenir compte, suivant l'idée que M. Jouaust avait émise vers 1930, de la réfraction atmosphérique *normale* due à la variation de l'indice de réfraction de l'air avec la hauteur en donnant au rayon de la Terre une valeur fictive de l'ordre de 30 % supérieure à la valeur réelle.

L'effet de la réfraction atmosphérique est donc en définitive favorable. Certains travaux récents exécutés pendant la guerre indiquent même que les ondes les plus courtes arrivent à se propager de manière tout à fait *anormale* bien au delà de la visibilité directe et d'autant mieux même qu'elles sont plus courtes. Par ailleurs, au-dessus de 5 000 Mc, le brouillard, la pluie, la grêle, etc. peuvent amener une absorption kilométrique croissante avec la fréquence et peut-être même sélective. Étant donné qu'il s'agit dans cet exposé de liaisons devant assurer un caractère de permanence et de stabilité, nous ne saurions tabler sur de telles conditions anormales (généralement favorables du reste), aussi nous limiterons-nous au cas où il n'est pas tenu compte de l'influence du milieu extérieur.

On obtiendra ainsi une valeur quasi minima du rapport signal à bruit, si la fréquence considérée est dans le domaine indiqué au début de 100 à 5 000 Mc.

La méthode employée par T. L. Eckersley et Van der Pol est la suivante :

On considère d'abord émetteur et récepteur au niveau du sol et l'on détermine l'équivalent de transmission dans ces conditions.

L'affaiblissement pour un trajet donné est ainsi en général considérable et dépend des caractéristiques du sol.

On tient compte ensuite, tant à l'émission qu'à la réception, de gains de hauteur qui eux aussi sont en général considérables et dépendent eux aussi des caractéristiques du sol.

On retranche ensuite les gains de hauteur exprimés en décibels, des pertes de transmissions calculées au sol et évaluées également en décibels pour avoir l'équivalent net de transmission.

Au point de vue de la précision il est évidemment peu recommandable d'opérer sur des nombres élevés et de faire leur différence, d'autre part, la conception de gains de hauteur à quelque chose d'un peu fictif, et il est bien évident que dès que l'on opère en visibilité directe, l'influence des caractéristiques du sol doit assez vite disparaître avec l'élévation du rayon passant sans obstruction au-dessus de la Terre.

Nous avons donc essayé de mettre les résultats sous une forme ne faisant intervenir que les hauteurs H, la distance entre émetteur et récepteur D, la distance d correspondant éventuellement à la portion du trajet au cours duquel on ne voit du sol ni l'émetteur, ni le récepteur ou bien au contraire où on les voit tous les deux, et la longueur d'onde. Pour plus de commodité les hauteurs et les longueurs d'onde seront exprimées en mètres et les distances en kilomètres.

Les gains de hauteur suivant les relations de Eckersley ou de Van der Pol s'expriment par des relations différentes suivant que la hauteur est faible ou grande, le critérium étant déterminé par la valeur de $h\lambda^{-\frac{2}{3}}$.

Si cette grandeur est supérieure à 50 suivant Eckersley (h et λ en mètres) ou à 56 suivant Van der Pol, on dira que les stations sont très surélevées. Si, au contraire, cette grandeur est plus faible que 50 on dira que les stations sont modérément surélevées.

Les hauteurs correspondant au critérum d'Eckersley sont donc approximativement

110 m	pour	100 Mc,
50 m	»	300 Mc,
7 m	»	50 000 Mc.

Enfin dans la gamme d'ondes considérées, le sol, s'il s'agit d'un trajet terrestre, ou la mer, mais seulement pour les ondes les plus courtes de la gamme, peut être considéré comme un diélectrique, autrement dit les courants de déplacement prédominent vis-à-vis des courants de conduction.

Dans ces conditions la constante diélectrique seule intervient et pour un trajet terrestre on pourra prendre $K = 5$ et pour un trajet maritime $K = 80$ (K constante diélectrique).

Van der Pol a alors montré que pour les hauteurs faibles, c'est-à-dire en dessous du critérium énoncé le gain de hauteur pouvait se mettre sous la forme simple

$$20 \log_{10}\left(1 + \frac{2\pi\sqrt{K-1}}{K}\frac{h}{\lambda}\right) \text{db},$$

soit pour $K = 5$ (terre) et $K = 80$ (mer) respectivement

$$20 \log_{10}\left(1 + 2,5\frac{h}{\lambda}\right) \text{db} \quad \text{et} \quad 20 \log_{10}\left(1 + 0,7\frac{h}{\lambda}\right) \text{db}.$$

Ceci peut se transformer en

$$(6) \quad \left\{ \begin{array}{l} 20 \log_{10} \dfrac{H}{\lambda} + 8 \text{ db pour la terre} \\ \text{et} \\ 20 \log_{10} \dfrac{H}{\lambda} - 3 \text{ db pour la mer,} \end{array} \right.$$

avec

$$H = h + 0,4\lambda \quad \text{pour la terre}$$

et

$$H = h + 1,4\lambda \quad \text{» la mer.}$$

Pour un trajet maritime et les ondes les plus longues de la gamme considérée, il y a lieu de substituer à la constante diélectrique la constante diélectrique complexe. On trouve alors sensiblement

Pour $\lambda = 1$ m, $20 \log_{10} \dfrac{H}{\lambda} - 4$ db, avec $H = h + 1,55\lambda$;

» $\lambda = 2$ m, $20 \log_{10} \dfrac{H}{\lambda} - 5,5$ db, » $H = h + 1,9\lambda$;

» $\lambda = 3$ m, $20 \log_{10} \dfrac{H}{\lambda} - 7$ db, » $H = h + 2,2\lambda$.

Nous avons donc substitué aux hauteurs vraies h, une hauteur fictive H dépendant de la longueur d'onde et de la nature du terrain et se confondant du reste très vite avec la hauteur vraie dès que h dépasse quelques longueurs d'onde, ce qui sera toujours amplement satisfait dans la pratique.

On peut maintenant, dans le cas d'une terre supposée parfaitement plane, montrer que l'affaiblissement à ajouter à la loi de l'inverse distance et dans le cas de stations modérément surélevées peut se mettre sous la forme

$$(7) \quad 44 - 20 \log_{10} \frac{H_1 H_2}{\lambda D} \text{ db},$$

où H_1 et H_2 sont les hauteurs fictives de l'émetteur et du récepteur. Ceci correspond à une expression du champ reçu de la forme

$$\varepsilon = \frac{A H_1 H_2}{\lambda D^2}.$$

Une telle relation peut être déduite directement de considérations d'optique géométrique, mais l'optique géométrique conduit à une absurdité dans le cas où les hauteurs deviennent nulles, le champ devenant forcément nul; l'introduction des hauteurs fictives H_1 et H_2 lève cette difficulté. Il vient en effet, en tenant compte de (7) pour $h_1 = h_2 = 0$,

$$\left(60 - 20 \log_{10} \frac{\lambda}{D}\right) \text{db pour la terre,}$$

$$\left(38 - 20 \log_{10} \frac{\lambda}{D}\right) \text{db} \quad \text{» la mer et } \lambda < 1 \text{ m,}$$

$$\left(33 - 20 \log_{10} \frac{\lambda}{D}\right) \text{db} \quad \text{» » et } \lambda = 2 \text{ m.}$$

Cette dernière relation montre que pour $\lambda = 2$ m et une même distance l'onde est affaiblie de 27 db de plus sur terre que sur mer, cette différence est conforme aux résultats publiées de T. L. Eckersley.

Mais en fait la Terre n'est pas plane et il y a lieu d'ajouter les pertes par diffraction.

Celles-ci peuvent également s'exprimer dans le cas d'une terre non infiniment conductrice toujours suivant Van der Pol au moyen du paramètre

$$\chi = \frac{1,85\,D}{a^{\frac{2}{3}}\lambda^{\frac{1}{3}}} = 5,43\,D\lambda^{-\frac{1}{3}}10^{-2},$$

Où a est le rayon de la Terre, par le tableau suivant :

	Décibels.		Décibels.
$\chi = 1$	4	$\chi = 4$	30
$\chi = 2$	11	$\chi = 5$	41
$\chi = 3$	19	$\chi = 6$	52,5

Pour $\chi > 1,5$. On peut écrire les pertes sous la forme

$$(8) \quad 14\chi - 30 \log \chi - 8 \text{ db}$$

ou l'équivalent

$$(9) \quad \frac{0,75\,D}{\sqrt[3]{\lambda}} - 30 \log_{10} D + 10 \log_{10} \lambda + 30 \text{ db}.$$

En continuant alors les relations (1), (7) et (9) il vient pour 1 W radié d'un dipôle

$$(10) \quad T = 3 - 10 \log_{10} D - \frac{0,75\,D}{\sqrt[3]{\lambda}} - 30 \log_{10} \lambda + 20 \log_{10} H_1 + 20 \log_{10} H_2 \text{ db}.$$

Exemple d'application : $h_1 = h_2 = 0$ sur terre d'où

$$H_1 = H_2 \doteq 0{,}4\lambda, \qquad D = 50 \text{ km}, \qquad \lambda = 2 \text{ m},$$
$$T = 3 - 17 - 30 - 9 - 2 - 2 = -57 \text{ db}.$$

Pour 1 kW radié, on aurait eu -27 db au-dessus du microvolt.

Sur les courbes publiées par Eckersley, on trouve -25 db.

Prenons maintenant

$$h_1 = 0, \quad \text{soit} \quad H_1 = 0{,}4\lambda;$$
$$h_2 = 50, \quad \text{»} \quad H_2 \doteq 50 \text{ m}.$$

On remontera l'équivalent de transmission de 36 db.

Pour 1 kW radié on aurait donc 9 db au-dessus du microvolt.

C'est ce que donne Eckersley à 1 db près.

Mettons les deux hauteurs à $H = 50$ m, on gagne à nouveau 36 db, de sorte que 36 db est le gain de hauteur, ceci est également conforme aux courbes de Eckersley si l'on considère que pour $H = 50$ m

$$H\lambda^{-\frac{2}{3}} \doteq 31.$$

La relation (10) permet donc de calculer aisément l'équivalent de transmission pour des hauteurs modérées ou nulles et à condition de ne pas être trop près de l'émetteur.

On voit par ailleurs que l'influence des caractéristiques du sol disparaît dès qu'émetteur ou récepteur se trouvent tant soit peu surélevés.

L'examen de la formule (10) montre qu'aux distances un peu grandes le terme principal est donné par

$$\frac{0{,}75\,D}{\sqrt[3]{\lambda}}.$$

Ce terme correspond à un affaiblissement exponentiel du champ. Si l'on avait tenu compte de la réfraction atmosphérique normale ce terme qui est relié au rayon de courbure du rayon aurait été

$$\frac{0{,}62\,D}{\sqrt[3]{\lambda}},$$

l'équivalent de transmission aurait été ainsi amélioré

En combinant seulement les relations (7) et (9) on obtient l'affaiblissement à ajouter à la loi de l'inverse distance.

Il est alors intéressant de considérer le cas où les stations émettrices et réceptrices sont situées toutes deux à des hauteurs telles que le rayon soit juste tangent à la terre en un point, nous dirons alors que la distance D est égale au double horizon.

Supposons les deux hauteurs H_1 et H_2 égales et éliminons la distance, liée à la hauteur par la relation

$$D = 7{,}2\sqrt{H}$$

(D en kilomètres, H en mètres), il vient

$$\text{Pertes} = 5{,}4\sqrt{H\lambda^{-\frac{2}{3}}} - 45\log_{10} H\lambda^{-\frac{2}{3}} + 65 \text{ db}.$$

Les pertes vis-à-vis de la loi de l'inverse distance sont ainsi une fonction du paramètre définissant le critérium d'Erckersley.

On trouve alors pour $\frac{H\lambda^{-\frac{2}{3}}}{50}$ égal à :

1/2, soit la moitié de la hauteur correspondant au critérium d'Eckersley : 29 db;

1, soit la hauteur correspondant au critérium d'Eckersley : 26 db.

Pour des hauteurs plus grandes nous ne sommes plus en droit d'utiliser les relations précédentes, considérons donc le cas de grandes hauteurs.

Pour des hauteurs dépassant le critérium d'Eckersley, on est amené à donner aux pertes à ajouter à la loi de l'inverse distance l'expression

$$(11) \qquad 14[\chi - (\chi_1 + \chi_2)] + 13\left[\frac{1}{\chi_1} + \frac{1}{\chi_2}\right] + 10[\log_{10}\chi_1 + \log_{10}\chi_2 - \log_{10}\chi] + 10 \text{ db},$$

dans laquelle χ est comme précédemment défini par

$$\chi = \frac{1{,}85\,D}{a^{\frac{2}{3}}\lambda^{\frac{1}{3}}},$$

$$\chi = \frac{1{,}85\,D}{a^{\frac{2}{3}}\lambda^{\frac{1}{3}}} = 5{,}43\,D\lambda^{-\frac{1}{3}}10^{-3},$$

où D est la distance entre émetteur et récepteur, et χ_1 et χ_2 par des expressions identiques où D_1 et D_2 sont les distances en *visibilité directe* à partir de l'émetteur et du récepteur.

Comme ces distances sont reliées elles-mêmes aux hauteurs H par la relation

$$D_{1,2} = 3{,}6\,H_{1,2}^{\frac{1}{2}},$$

$$(12) \qquad \chi_{1,2} \doteq 0{,}2\left(H\lambda^{-\frac{2}{3}}\right)^{\frac{1}{2}}.$$

On retrouve encore l'expression en fonction du paramètre d'Eckersley.

Considérons à nouveau une transmission telle que le rayon tangente la Terre en un seul point

$$\chi - (\chi_1 + \chi_2) = \Delta\chi = 0,$$

on peut voir que le reste de l'expression (11) vaut approximativement 20 db pour toutes les valeurs élevées de χ_{12}.

En particulier si les hauteurs H_1 et H_2 sont égales et ont la valeur du critérium d'Eckersley, la relation (11) donne 26 db comme précédemment trouvé.

— Pour une hauteur commune double de celle du critérium d'Eckersley : 23 db.

— Pour une hauteur commune triple de celle du critérium d'Eckersley : 21 db.

— Au delà : 20 db.

Ces pertes tendent donc asymptotiquement vers 20 db. Comme d'autre part le facteur

$$14[\chi-(\chi_1+\chi_2)] = 14\,\Delta\chi = \frac{0,75\,d}{\sqrt[3]{\lambda}}.$$

Nous écrirons dans le cas de transmissions entre points très surélevés et effectuées au delà de la visibilité directe que la perte à ajouter à la loi de l'inverse distance est égale à

$$(13) \qquad \frac{0,75\,d}{\sqrt[3]{\lambda}} + 20 \text{ db}$$

d signifiant le trajet au cours duquel on ne voit du sol ni l'émetteur, ni le récepteur.

Si l'on tenait compte de la réfraction « normale » on aurait

$$\frac{0,62\,d}{\sqrt[3]{\lambda}} + 20 \text{ db}.$$

On voit ainsi que pour la fréquence de 100 Mc la relation (13) donne au delà de l'horizon un affaiblissement kilométrique de 0,5 db environ par kilomètre alors que la fréquence de 5 000 Mc donne un affaiblissement kilométrique de 2 db environ.

Si au contraire la transmission s'effectue en deçà de la visibilité directe, mais toujours assez près de la limite de visibilité, on pourra encore utiliser la relation (13) en y faisant d négatif, ceci dans la limite où le résultat est positif.

d est alors la distance correspondant à la partie du trajet d'où l'on voit du sol simultanément l'émetteur et le récepteur.

Pour 1 W radié par un dipôle, l'équivalent de transmission devient donc

$$(14) \quad T = 57 - \frac{0,75\,d}{\sqrt[3]{\lambda}} - 20 \log_{10} D \text{ db au-dessus du } \mu\text{V}.$$

Il est enfin un cas que nous n'avons pas encore considéré, c'est celui où l'une des stations est très surélevée au sens du critérium d'Eckersley et où la seconde ne l'est pas, de sorte que les gains de hauteur pour l'une et l'autre s'écrivent avec des expressions différentes.

On trouve alors pour l'expression des pertes à ajouter à la loi de l'inverse distance

$$(15) \quad \frac{0,75\,d}{\sqrt[3]{\lambda}} + \frac{66}{\sqrt{H_1\lambda^{-\frac{2}{3}}}} - 20\log_{10} H_2\lambda^{-\frac{2}{3}} + 35 \text{ db},$$

avec

$$H_1\lambda^{-\frac{2}{3}} > 50 \quad \text{et} \quad H_2\lambda^{-\frac{2}{3}} < 50,$$

d étant alors la distance en kilomètres au delà de l'horizon de la station la plus surélevée.

On remarquera alors que si l'émetteur est très surélevé et que l'on soit juste à l'horizon de l'émetteur, de sorte que les deux premiers termes deviennent nuls, la relation (15) donne zéro pour $H\lambda^{-\frac{2}{3}} = 56$, valeur correspondant au critérium de Van der Pol, autrement dit : si le récepteur est situé à la hauteur correspondante on trouve la loi de l'inverse distance.

Enfin si le récepteur étant toujours placé à la même hauteur l'on s'éloigne de l'émetteur de la distance $d = 3,6\sqrt{H_2}$, ce qui revient à avoir émetteur et récepteur à la limite de visibilité directe on trouve 20 db de perte. Ceci corrobore les résultats précédents.

La relation (15) permet d'écrire que l'équivalent de transmission pour 1 W radié par un dipôle est

$$(16) \quad T = 42 - 20\log_{10} D - \frac{0,75\,d}{\sqrt[3]{\lambda}} + \frac{66}{\sqrt{H_1\lambda^{-\frac{2}{3}}}} - 20\log_{10}\left(H_2\lambda^{-\frac{2}{3}}\right) \text{ db au-dessus du } \mu\text{V}.$$

Les relations (10), (14), (16) englobant donc tous les cas, et pour avoir l'équivalent de transmission réel il y a lieu d'ajouter encore les gains dus aux aériens utilisés et donnés par la relation (2).

Nous terminerons cette partie de notre exposé en rappelant que nous nous sommes limités à des trajets au delà ou tout au moins peu en deçà de la limite de visibilité. S'il n'en était pas ainsi et si, par exemple, on considérait le champ à assez faible distance de l'émetteur, on se trouverait dans une zone où le rayon réfléchi par le sol interfère avec le rayon direct. La solution du problème est alors beaucoup plus compliquée, tandis que pour que les distances envisagées il n'y a plus d'interférences à considérer et la série donnant l'expression du champ converge suffisamment assez rapidement pour que seul le premier terme soit à retenir.

2. Prédétermination du rapport signal à bruit.

Pour un champ de 1 μV/m, la puissance développée dans une antenne demi-onde isolée dans l'espace et débitant en court-circuit est donnée par l'expression (3) qui peut s'écrire en décibels

(17) $$20 \log_{10} \lambda - 149 \text{ db vis-à-vis du watt.}$$

Par ailleurs on sait que la puissance théorique de bruit due à l'agitation thermique et à la température ambiante est voisine de

$$1{,}6.10^{-20} \Delta f \text{ watt.}$$

Δf étant la largeur de bande de fréquence dans laquelle on doit considérer le bruit. Pour une communication téléphonique commerciale et quel que soit le système de modulation adopté (modulation d'amplitude, de fréquence, modulation par impulsions brèves) la sélection finale fait toujours intervenir une même largeur de bande quitte à caractériser l'efficacité de tel ou tel système de modulation par un gain propre et que nous désignerons par la suite par M pour le distinguer du gain des aériens. Cette largeur de bande est évaluée à deux fois le spectre téléphonique et peut par conséquent être prise égale à 6 000 cycles environ. Il s'ensuit que le bruit théorique se chiffre à

$$10^{-16} \text{ watt.}$$

Le bruit réel sera $N.10^{-16}$ watt.

N désigne le facteur de bruit, c'est-à-dire le nombre par lequel il faut multiplier le bruit théorique pour avoir le bruit réel.

On écrira donc pour la puissance de bruit

$$10 \log_{10} N - 160 \text{ db vis-à-vis du watt,}$$

d'où le rapport signal à bruit pour un champ de 1 μV/m

(18) $$20 \log_{10} \lambda - 10 \log_{10} N + 11 \text{ db.}$$

Quelle est maintenant la valeur de N ?

Tout d'abord quand on adapte un récepteur au maximum de puissance, ce que l'on a tout intérêt à faire dans l'état actuel de la technique, N ne saurait tomber en dessous de 2. Ceci résulte du fait bien connu qu'en « surcouplant » à l'entrée d'un récepteur de manière à adapter au minimum de bruit on ne peut gagner que 3 db au maximum

N est d'une part de l'énergie de bruit recueillie par l'aérien, d'autre part, de l'énergie de bruit due au souffle des lampes ou du détecteur.

Aux fréquences relativement basses de la gamme envisagée, l'énergie de bruit est due à l'aérien presque exclusivement, et si cette énergie est uniformément répartie dans toutes les directions, on n'en recevra qu'une partie d'autant plus faible que la directivité de l'aérien sera plus grande; le gain de l'aérien joue donc à la réception comme à l'émission.

Vers 100 Mc, N peut être pris de l'ordre de 30, soit $10 \log_{10} N \# 15$ db.

Quand la fréquence augmente, le bruit dû à l'aérien diminue rapidement (*voir* en particulier les travaux de Grote Reber, *Procedings of the Institute of Electrical Engineers*, février 1940), par contre la contribution au bruit due au détecteur augmente rapidement.

Au-dessus de 1 000 Mc, le bruit est dû entièrement au récepteur, et comme l'énergie reçue du signal est affectée du gain de l'aérien, le rapport signal à bruit doit toujours être calculé en tenant compte de ce gain.

Pour un bon détecteur à cristal et des ondes de 3 000 Mc le facteur N paraît être de l'ordre de 10, d'où $10 \log_{10} N = 10$ db. En définitive et en gros N ne varie que de quelques décibels dans la bande de fréquences envisagée.

Introduisant le gain des aériens d'une part [relation (2)], la relation (18) et T donné par l'une des relations (10), (14) ou (16), on pourra écrire le rapport signal à bruit exprimé en décibels sous la forme

(19) $$R = T + 10 \log_{10} S_1 + 10 \log_{10} S_2 - 20 \log_{10} \lambda - 10 \log_{10} N + 23 + M \text{db,}$$

M étant le gain non encore évalué dû au système de modulation employé.

A titre d'exemple, considérons une fréquence de 3 000 Mc, soit $\lambda = 0{,}1$ m et un trajet de 50 km correspondant au double horizon ($d = 0$).

Ceci peut correspondre à deux stations surélevées de 50 m vis-à-vis du terrain environnant. Une telle hauteur est grande pour cette onde devant celle définie par le critérium d'Eckersley. On aura donc d'après (14) $T = 23$ db.

Supposons les aériens constitués par des cornets de 1 m² d'ouverture et que N soit égal à 10, il viendra

$$R = 56 + M \text{db.}$$

Supposons maintenant dans les mêmes conditions que les hauteurs H_1, H_2 ne soient plus que 30 m.

La distance correspondant au double horizon est alors de 40 km seulement et, par suite, l'onde a à

parcourir $d = 10$ km en diffraction, il faudra retrancher de R

$$\frac{0,75\,d}{\sqrt[3]{\lambda}} \# 16 \text{ db}.$$

Le rapport R ne sera plus que de $40 + M$ db.

Baissons maintenant la fréquence de 3 000 à 300 Mc, soit $\lambda = 1$ m et reprenons des stations surélevées de 50 m, la distance restant toujours de 50 km.

Les pertes vis-à-vis de la loi de l'inverse distance sont majorées de 6 db, les stations se trouvant juste à la hauteur correspondant au critérium d'Eckersley, soit $T = 17$ db.

Donnons aux aériens (rideaux d'antennes par exemple) une dimension de 10 m² et supposons toujours $N = 10$.

On trouve alors pour le rapport signal à bruit

$$R = 50 + M \text{ db},$$

soit 6 db de moins que pour l'onde de 10 cm.

Réduisons comme tout à l'heure les hauteurs H_1, H_2 de telle sorte qu'elles ne soient plus que de 30 m.

On doit alors appliquer la relation (10), ce qui donne $T = 8,5$ db.

Par contre, les 10 km représentant d ne donnent plus lieu qu'à 7,5 db de pertes supplémentaires.

Le rapport signal à bruit devient

$$R = 34 + M \text{ db},$$

soit encore 6 db de moins que pour l'onde de 10 cm.

On voit donc tout l'intérêt dans le cas général que l'on a à augmenter la fréquence, avec toutefois ce correctif que lorsque pour une cause ou une autre, la visibilité directe est impossible, les ondes de fréquence plus faible se diffractent mieux.

Il nous reste à examiner le facteur M caractérisant le gain dû au système de modulation adopté. Nous considérons seulement ici le cas du multiplex en modulation de fréquence qui se prête particulièrement bien à la jonction d'un tronçon radioélectrique avec des câbles coaxiaux exploités suivant la technique des courants porteurs.

Dans ce cas particulier

$$M = 20 \log_{10} \frac{\Delta f_1}{F_1} \text{ db},$$

où Δf_1 et F_1 représentent respectivement la déviation de fréquence due à la modulation du canal considéré et la fréquence moyenne des courants dans ce canal. M est d'autant plus élevé que la bande de fréquences couverte est plus grande.

Pour un multiplex à 12 voies téléphoniques dans la gamme 12 à 60 kc, on pourra par exemple avoir

$$\frac{\Delta f_1}{F_1} = \frac{90}{30} = 3,$$

90 kc étant la déviation de fréquence du canal moyen 28 à 32 kc.

Pour ce cas particulier $M = 10$ db, ce qui signifie que le rapport signal à bruit pour ce multiplex à douze voies est de 10 db plus élevé que celui que l'on aurait avec un seul canal et une modulation de 100 % en amplitude, la puissance en régime porteur dans ce dernier cas étant égale à la puissance en modulation de fréquence.

Pour un multiplex à plus grand nombre de voies, le facteur M diminuera d'une part du fait que la déviation de fréquence totale devra être répartie sur un plus grand nombre de canaux et du fait que la fréquence moyenne des canaux augmentera. Néanmoins la probabilité statistique qu'un grand nombre de canaux soient modulés simultanément joue favorablement, de sorte que M pourra encore être positif.

Revenant à l'exemple choisi de communications sur 50 km avec surélévations des deux stations de 50 m et une fréquence de 3 000 Mc, on voit que pour 12 voies

$$R = 66 \text{ db}.$$

On en conclut donc que des puissances de l'ordre du watt sont suffisantes sur ces ondes ultra-courtes pour assurer des communications d'excellente qualité quant au rapport signal à bruit.

En fait, si l'on considère une liaison avec relais interposés, les puissances de bruit s'ajouteront en général. Dans le cas de n tronçons identiques et également affectés par le bruit on aura ainsi une diminution de R de $10 \log_{10} n$ db.

Si l'on considère maintenant d'autres systèmes de modulation que la modulation de fréquence, tels que les systèmes à impulsions brèves, modulées en durée ou en position, on constate que le facteur M peut atteindre des valeurs du même ordre de grandeur, quand on élargit suffisamment la bande de transmission et que l'on évalue le coefficient de transmission d'après la puissance *moyenne* de l'émetteur travaillant en régime d'impulsions.

3. Communications à longue portée.

Nous avons été amenés à considérer dans nos exemples des trajets d'assez faible distance, de l'ordre de 50 km, et la puissance nécessaire a été

évaluée de l'ordre du watt, ce sont là des conditions de terrain plat ou moyennement vallonné.

Il est des cas néanmoins, par exemple s'il s'agit de réunir entre elles des îles plus ou moins montagneuses, ou des îles au continent, où il devient impératif d'avoir des portées beaucoup plus considérables car il est impossible de couper le trajet par des relais.

Quelles seront alors les répercussions sur les fréquences à adopter et les puissances ?

Considérons un cas typique où la communication comporte une distance de 200 km sur mer et où les emplacements accessibles pour les stations sont à 500 m d'altitude au-dessus du niveau de la mer. Les visibilités de l'émetteur et du récepteur sont alors $D_1 = D_2 = 3{,}6\sqrt{H} \# 80$ km.

On aura donc à effectuer $d = 40$ km en diffraction.

D'autre part, pour toute la gamme de fréquences considérée, on est au-dessus du critérium d'Eckersley et, par suite, la relation (14) est applicable. Admettons par ailleurs pour appliquer la relation (19) que quel que soit la fréquence employée on ait

$$S_1 = S_2 = S, \qquad \frac{S}{\lambda} = 20 \qquad \text{et} \qquad M - 10 \log_{10} N = 0.$$

En combinant (14) et (19) il vient

$$R = 57 - 20 \log_{10} D - \frac{0{,}75\, d}{\sqrt[3]{\lambda}} + 20 \log_{10} \frac{S}{\lambda} + 23 \text{ db}.$$

Soit pour 1 W radié :

$$\begin{aligned}
\lambda &= 0{,}06 \text{ m}, & f &= 5\,000 \text{ Mc} : R = -20 \text{ db},\\
\lambda &= 0{,}10 \text{ m}, & f &= 3\,000 \text{ »} : R = -\ \ 4 \text{ »},\\
\lambda &= 1 \text{ m}, & f &= 300 \text{ »} : R = +30 \text{ »},\\
\lambda &= 3 \text{ m}, & f &= 100 \text{ »} : R = +40 \text{ ».}
\end{aligned}$$

On voit alors que sauf conditions anormales de propagation, une liaison de bonne qualité est impraticable dans la partie courte de la gamme et qu'au contraire aux fréquences les plus basses on pourra obtenir un rapport signal à bruit de 60 db en élevant la puissance à 100 W.

Par ailleurs la surface des aériens sera alors de 60 m² correspondant à un gain d'aérien de 14 db seulement facilement réalisable.

Supposons maintenant que dans le voisinage d'une des stations, l'émetteur par exemple, il y ait des sites suffisamment élevés pour que le champ reçu soit celui donné par la loi de l'inverse distance, mais que pour des raisons quelconques il soit impossible d'y installer une station.

Déterminons d'abord, la distance étant toujours 200 km, la hauteur minima nécessaire pour qu'il en soit ainsi.

Si nous adoptons l'onde de 6 cm (5 000 Mc) nous devrons avoir

$$-d = 10 \text{ km}$$

pour annuler les 20 db de perte vis-à-vis de la loi de l'inverse distance de la relation (14).

La visibilité de l'émetteur devra ainsi être portée à 130 km, ce qui correspond à une hauteur de 1 300 m. environ.

Nous pourrons disposer à l'endroit de ce site, suivant une idée émise depuis longtemps déjà par M. Lœb (voir *Onde Electrique*, juillet 1938) une surface réfléchissante épousant la surface de l'ellipsoïde passant par ce point et ayant les deux extrémités de la liaison pour foyers, nous aurons ainsi constitué un relais passif ne comportant aucun équipement. L'énergie reçue et réfléchie par un tel relais est évidemment proportionnelle à la surface projetée suivant le plan de l'onde, et il y a par suite tout intérêt à ce que les rayons frappent la surface sous un angle d'incidence élevé, ceci veut dire qu'il y a intérêt à placer le réflecteur à l'arrière, ce qui n'est évidemment pas toujours possible et accroît la distance du relais passif au récepteur.

On pourra en fait tout aussi bien disposer le relais en un point quelconque en le constituant par exemple au moyen de deux cornets orientés respectivemeut vers l'émetteur et le récepteur et joints entre eux par un court élément de guide.

On peut alors facilement calculer la perte provoquée par ce relais passif, cette perte étant définie par le rapport de l'énergie reradiée par le relais à l'énergie émise par l'émetteur.

Pour ce faire nous négligerons les pertes ohmiques dans le relais lui-même.

Les relations (1), (17) et (2) nous donnent directement

$$[77 - 20 \log_{10} D_0] + [20 \log_{10} \lambda - 149] + 2\,[10 \log_{10} S_0 - 20 \log_{10} \lambda + 6],$$

soit

$$(20) \qquad 20 \log_{10} \frac{S_0}{\lambda\, D_0} - 60 \text{ db},$$

S_0 et D_0 étant respectivement la surface utile en mètres carrés et la distance en kilomètres de l'émetteur au relais.

Le gain du relais exprimé par le troisième terme entre crochets est à prendre deux fois étant donné qu'il joue une première fois dans la captation de l'énergie et une seconde fois dans la réémission de l'énergie captée sous un angle d'autant plus faible que le gain est élevé.

On peut noter du reste que si l'on définit l'angle total d'ouverture Θ du faisceau comme étant l'angle à l'intérieur duquel l'énergie ne tombe pas en dessous de 4 db vis-à-vis du maximum situé dans l'axe et pour un faisceau ayant une directivité sensiblement égale dans le plan horizontal et le plan vertical, Θ est relié directement au gain et donné par la relation approximative

$$\Theta \neq \frac{\lambda}{\sqrt{S}} \text{ radians.} \tag{21}$$

La relation (20) nous montre alors que pour $D_0 = 5$ km, $\frac{S_0}{\lambda} = 50$, la perte introduite est de 40 db.

Par ailleurs, si l'émetteur pouvait être installé à l'endroit du relais passif le rapport signal à bruit serait

$$R = 77 - 20 \log_{10} D + 20 \log_{10} \frac{S}{\lambda} + 23 = 80 \text{ db.}$$

On en conclut qu'avec le relais passif interposé on aura $R = 40$ db. Soit encore $R = 60$ db si la puissance est portée à 100 W. Bien entendu par application du théorème de réciprocité, on peut aussi bien envisager le relais passif au voisinage du récepteur.

On est ainsi conduit à

$$S_0 = 3 \text{ m}^2, \quad \lambda = 6 \text{ cm}, \quad f = 5\,000 \text{ Mc},$$

$$S_0 = 5 \text{ » }, \quad \lambda = 10 \text{ » }, \quad f = 3\,000 \text{ Mc},$$

les angles Θ étant respectivement de 2° et 2°,5.

Les deux solutions paraissent donc dans le cas de l'exemple cité acceptables, la seconde n'étant rendue possible que par la nature du terrain, mais on voit que dans tous les cas la puissance au départ doit être, toutes choses égales d'ailleurs, considérablement accrue.

LIMITATIONS PRATIQUES DE LA PUISSANCE ET DU RENDEMENT DES KLYSTRONS A DEUX CAVITÉS

PAR P. GUÉNARD,

Agrégé de Sciences physiques,
Laboratoire de Recherches « Tubes Électroniques » de la Compagnie Générale de Télégraphie sans fil.

SOMMAIRE. — *A l'aide de représentations simplifiées des principaux facteurs déterminants, l'auteur étudie comment la puissance haute fréquence et le rendement utile d'un klystron à deux cavités sont limités en fonction de la fréquence de travail.*

Introduction.

Les klystrons à deux cavités ont un rendement notablement inférieur à 0,58, valeur maximum que prévoit l'analyse élémentaire, maintenant classique, de ce type de tube. Cet écart doit être principalement attribué au fait que cette analyse néglige les effets de la charge d'espace [1] et ceux des temps de transit des électrons dans les champs de haute féquence [2], et qu'elle n'envisage pas les pertes dans les circuits, facteur important qui rend compte de la décroissance rapide du rendement vers les longueurs d'onde les plus courtes. Cet effet, lié à la diminution de la puissance appliquée qui accompagne la réduction des dimensions du tube [3], explique que les puissances utiles qui se chiffrent par des kilowatts aux longueurs d'onde les plus grandes du domaine d'application de ces tubes, s'expriment en milliwatts à l'autre extrémité de leur gamme.

On se propose de préciser dans cet article comment se manifestent ces variations de puissance et de rendement en fonction de la longueur d'onde de travail.

Divers principes ont été envisagés pour accroître à longueur d'onde donnée, soit la puissance utile, soit le rendement des tubes à modulation de vitesse; dans le « prionotron », par exemple, la valeur du rendement idéal dépasse nettement celle de 58 %, liée au mécanisme élémentaire de fonctionnement du klystron ordinaire à deux cavités. De ces principes, dont certains ont été esquissés récemment [4], [5], il ne sera pas question ici. L'analyse ne vise en effet que le type habituel de klystron à deux cavités — type dit de Hansen-Varian — sous une forme particulière qui a été trouvée bien adaptée à l'obtention de puissances élevées dans le domaine des ondes centimétriques; néanmoins, elle a une portée plus générale car elle décrit le comportement, en fonction de la longueur d'onde, de tous les types de tubes à modulation de vitesse qui, sans être des klystrons à deux cavités, fonctionnent sur le même principe et utilisent des circuits analogues; d'un type à l'autre, les différents domaines de variations pourront être décalés par rapport aux longueurs d'onde, les valeurs de la puissance et du rendement modifiées assez notablement, mais l'aspect général restera le même.

Considérations générales.

Le dispositif particulier étudié est un klystron à deux cavités dans lequel les champs alternatifs ne sont pas limités par des grilles. La présence de grilles, qui captent une fraction non négligeable du courant électronique, est en effet difficilement compatible avec l'utilisation des densités de courant élevées que requiert le fonctionnement de ces tubes poussés aux limites de leurs possibilités. Schématiquement, ce tube comporte un cylindre métallique, porté au potentiel V_0, dont l'espace intérieur est parcouru par un faisceau électronique et qui est interrompu par deux fentes qui font elles-mêmes partie de deux cavités résonnantes. Le diamètre du cylindre étant nettement plus petit que la

longueur d'onde, les champs alternatifs sont pratiquement limités sur le parcours du faisceau électronique à la région voisine des fentes, région où la forme des champs est très sensiblement identique à celle des champs continus produits par l'application d'une différence de potentiel constante entre les deux éléments du cylindre séparés par la fente.

Un organe convenable envoie dans ce tunnel un faisceau électronique, qui peut éventuellement y être guidé par un champ magnétique parallèle à l'axe du système, ajoutant son effet à celui du canon électronique qui concentre le faisceau à l'entrée du tunnel.

Les échanges d'énergie H. F. comprennent, outre l'énergie utile fournie à la charge, une absorption d'énergie dans les parois des cavités et les circuits de couplage où cette énergie se transforme en chaleur, et des échanges d'énergie entre les champs H. F. et le faisceau électronique, que l'on peut grossièrement diviser en une cession d'énergie de la composante alternative du faisceau dans la deuxième cavité, et en une absorption d'énergie liée dans les deux cavités à la composante continue du faisceau électronique. Le tube cesse d'osciller lorsque le bilan total des échanges d'énergie est nul, ce qui définit la condition d'accrochage du tube.

Si, sans modifier les champs, on augmente l'intensité du courant transporté par le faisceau électronique, l'importance relative de l'énergie absorbée par les pertes ohmiques diminue; on améliore donc le rendement du tube. On est limité dans cette voie par l'impossibilité de maintenir un courant intense dans un tunnel, sans qu'une fraction appréciable des électrons se perde sur les parois. D'autre part, les effets de la charge d'espace, qui tendent à diminuer la composante alternative du courant transporté par le faisceau électronique d'autant plus que la densité spatiale de charge est plus grande, peuvent compenser le gain de rendement qu'on attendrait d'un accroissement de l'intensité.

Les effets de la charge d'espace, tant statiques que dynamiques, apportent donc une première limitation aux possibilités du tube. Cette limitation est aggravée, vers les courtes longueurs d'onde par une diminution rapide du courant total qui traverse le tube, diminution liée à la décroissance des dimensions de la cathode et à la densité de courant limitée, qu'elle est susceptible d'émettre.

La diminution de la longueur d'onde entraîne d'autre part une diminution de la qualité des cavités, c'est-à-dire une augmentation de l'importance relative des pertes ohmiques.

Enfin, si les limitations précédentes permettent d'appliquer une puissance considérable, on peut être limité par la puissance maximum que peut dissiper le tube et par la tension maximum qu'il peut supporter.

Notations.

On utilisera le plus souvent des grandeurs sans dimensions. Le même symbole sera affecté à ces grandeurs sans dimensions et aux quantités qu'elles représentent, ces dernières s'en distinguant par un accent. Les longueurs seront mesurées en centimètres, les courants en ampères et les tensions en kilovolts, les puissances en kilowatts, les résistances en kiloohms, etc.

Soient :

V_0	la tension d'accélération des électrons,
v_0	la vitesse correspondante,
i_0	l'intensité du courant,
$R_0 = \frac{V_0}{i_0}$	l'impédance du faisceau,
λ	la longueur d'onde,
$\omega = \frac{2\pi c}{\lambda}$	la pulsation.

Pour obtenir des grandeurs sans dimensions, on les rapportera aux quantités précédentes. Les tensions seront rapportées à V_0, les vitesses à v_0, les impédances à R_0, les longueurs à $\frac{v_0}{\omega}$, leur mesure coïncidant ainsi avec l'angle de transit statique des électrons, les temps à $\frac{1}{\omega}$, etc.

Les dimensions géométriques du tunnel de glissement sont : le rayon b, la largeur d des fentes et la distance l des plans médians des deux fentes. U_1 et U_2 désignent les amplitudes des tensions alternatives en chacune des deux fentes, U_1 se rapportant à la fente du rassembleur, U_2 à la fente du collecteur, R_p représente l'impédance shunt à vide des cavités, A_p l'admittance correspondante, A_f l'admittance équivalente du faisceau non modulé, p la valeur quadratique moyenne du coefficient d'efficacité longitudinal de la fente.

Étude des différents facteurs limitatifs.

a. Influence de la charge d'espace dans le tunnel de glissement. — Cette influence se manifeste sous plusieurs aspects :

1° Lorsque le faisceau n'est pas guidé dans le tunnel de glissement par un champ magnétique, la charge d'espace entraîne une divergence du

faisceau qui, lorsque le tube n'oscille pas, limite le courant à la valeur

$$i_0 = 4,88 \frac{b^2}{l^2} V_0^{\frac{3}{2}}.$$

Il est commode de rapporter le courant qui traverse effectivement le tube à cette valeur limite. Nous écrirons donc en général

$$(1) \qquad i_0 = 4,88\, \alpha \frac{b^2}{l^2} V_0^{\frac{3}{2}},$$

le coefficient α étant, dans le cas d'une focalisation purement électrostatique, au maximum égal à l'unité.

Lorsque le tube oscille, il apparaît, par rapport au résultat précédent, des divergences dues à l'effet de lentille du champ H. F. du rassembleur [6] et à la divergence accrue au niveau des paquets électroniques [7]. Ces effets, auxquels s'ajoutent les imperfections des canons électroniques, limitent, dans le cas d'une focalisation purement électrostatique, α à une valeur inférieure à l'unité, valeur que l'expérience montre être environ 0,5.

2° L'étalement radial des paquets électroniques s'accompagne d'un étalement longitudinal qui diminue la composante alternative du courant transporté par le faisceau électronique. Cet effet est envisagé dans l'Annexe II qui donne une valeur approchée de la correction à introduire pour tenir compte de ce dégroupement longitudinal. Cette correction se traduit par un coefficient M d'autant plus petit que les effets de dégroupement sont plus importants et qui multiplie le degré de rassemblement calculé sans charge d'espace; l'expression usuelle de la composante fondamentale devenant, dans le cas de champs étroits,

$$2\, i_0 J_1 \left(l \frac{U_1}{2} M \right),$$

M est exprimé en fonction d'un paramètre k

$$(2) \qquad k = 2,2\, \alpha^{\frac{1}{2}} b = l V_0^{-\frac{3}{2}} i_0^{\frac{1}{2}}.$$

3° Ce facteur de correction M a été calculé en supposant que la charge d'espace statique est annulée par une charge égale et opposée qui ne participe pas aux variations alternatives de la charge d'espace électronique.

En fait, cette charge d'espace électronique existe et crée un creux de potentiel sur l'axe du tube : elle introduit donc un déphasage entre les courants électroniques inégalement éloignés de l'axe et provoque une diminution de la composante alternative moyenne du faisceau électronique. En supposant le tube infiniment long et le diamètre du faisceau égal à celui du tube, le rapport du potentiel à une distance r de l'axe au potentiel sur l'axe est, en première approximation, donné par [8]

$$\frac{V(r)}{V(0)} = 1 + \frac{K}{4} \left(\frac{r}{b} \right)^2 \qquad \text{avec} \quad K = 1,92\, i_0 V_0^{-\frac{3}{2}}.$$

Pour une modulation de vitesse uniforme dans la section du faisceau ce déphasage conduit à multiplier la composante alternative par $\sin \frac{\frac{Kl}{16}}{\frac{Kl}{16}}$. Cet effet est négligeable vis-à-vis de l'effet précédent. Ce facteur vaut en effet 0,9 pour $\frac{Kl}{16} = 0,8$, ce qui correspond à une valeur de α égale à $5,5 \frac{l}{b^2}$, nettement supérieure aux valeurs que permet l'effet de dégroupement longitudinal.

b. Limitation de la densité de courant à la surface de la cathode. — La densité de courant admissible à l'entrée du tunnel de glissement est limitée par l'émission de la cathode et les effets de charge d'espace dans le canon électronique. Elle peut varier dans de grandes proportions suivant le type de canon électronique utilisé et la matière émissive [1]. Nous garderons cette quantité comme paramètre dans les calculs ultérieurs. En appelant I' cette densité de courant, le courant total vaut donc au maximum

$$i_0 = I' \pi b'^2 = \frac{\pi \lambda^2}{10\,000} V_0 b^2 I'$$

et l'impédance du faisceau est au minimum égale à

$$(3) \qquad R_0 = \frac{10\,000}{\pi \lambda^2 b^2 I'}.$$

c. Pertes dans les cavités. — L'impédance shunt des cavités dépend de leurs dimensions rapportées à leur longueur d'onde de résonance. Deux de ces dimensions intéressent directement le faisceau électronique, le diamètre $2b$ du tunnel de glissement et la largeur d de la fente. Ces deux dimensions étant données, l'impédance shunt de la cavité peut être

---

[1] L'utilisation de faisceaux convergents produits par des canons électroniques tels que ceux décrits par Pierce, permet d'obtenir à l'entrée du tunnel de glissement, des densités de courant nettement supérieures aux densités de courant à la surface de la cathode et de s'affranchir ainsi des limites étroites qu'imposent les propriétés des matières émissives.

rendue maximum par un choix convenable des autres dimensions de la cavité. Cette valeur maximum a été déterminée en se limitant à la forme de cavité

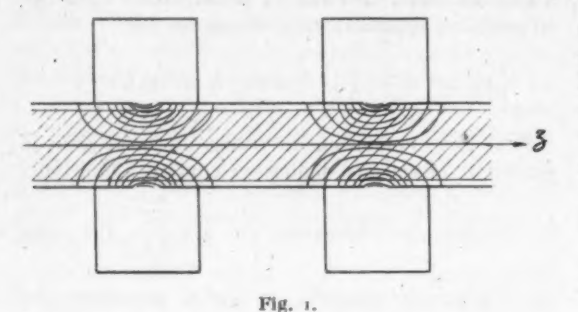


Fig. 1.

représentée sur la figure 2, à partir des valeurs calculées de l'impédance shunt de ces cavités [9]. Les résultats obtenus se laissent représenter avec

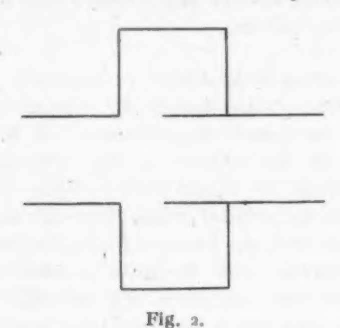


Fig. 2.

une très bonne approximation, dans leur domaine usuel d'application par la formule empirique

$$R'_p = 12\pi\lambda^{\frac{1}{2}} \frac{\dfrac{d'}{\lambda}}{\dfrac{1}{2}\left(\dfrac{b'}{\lambda}\right)^{\frac{3}{2}} + \dfrac{1}{20}\dfrac{d'}{\lambda}},$$

valable pour des cavités à parois de cuivre. La figure 3 représente les variations de $\dfrac{R'_p}{12\pi\lambda^{\frac{1}{2}}}$ en fonction de $\dfrac{d'}{\lambda}$ et $\dfrac{b'}{\lambda}\cdot$ L'impédance shunt A'_p de ces cavités prend ainsi, en fonction de b et d, la forme

$$(4) \qquad A'_p = \frac{\lambda^{-\frac{1}{2}}}{720}\left[1 + \frac{b^{\frac{3}{2}}}{d} V_0^{\frac{1}{4}}\right]\cdot$$

d. Tension d'accélération des électrons et puissance appliquée maximum. — La tension d'accélération maximum est liée au champ électrique maximum que l'on peut admettre au voisinage des différentes électrodes. Elle est donc liée aux dimensions linéaires du tube et décroît en même temps que la longueur d'onde. En fait, comme le montre la suite des calculs, cette tension n'intervient que peu dans l'expression du rendement. Une valeur grossièrement approchée est donc suffisante. Nous admettrons que cette tension exprimée en kilovolts est égale à la longueur d'onde mesurée en centimètres, cette hypothèse très simple conduisant d'ailleurs à des valeurs de la tension de l'ordre de grandeur de celles qu'on rencontre dans les tubes du type étudié ici.

La puissance que peut dissiper le tube est liée à la densité de puissance transportée par le faisceau.

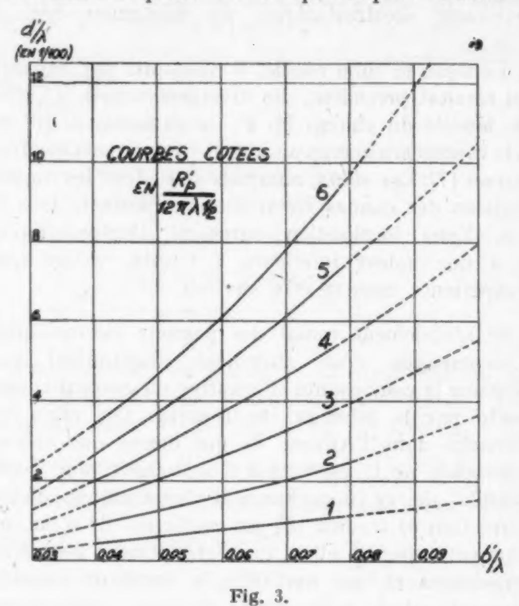


Fig. 3.

En admettant pour cette densité de puissance la valeur 10 kW/cm² [2], cette limitation se traduit donc par la condition

$$V_0 I' \leqq 10$$

ou, pour la puissance W'_0 appliquée au tube,

$$W'_0 \leqq 0{,}003\,\lambda^2 V_0 b^2.$$

[2] Une telle densité de puissance n'est compatible avec les possibilités de dissipation des anodes en cuivre (environ 100 W : cm²) qu'en répartissant la puissance transportée par le faisceau à sa sortie du tunnel de glissement sur une grande surface. Ce résultat peut être obtenu par l'utilisation d'anodes allongées, l'étalement du faisceau sur ces anodes résultant, soit de la divergence du faisceau sous l'action des répulsions mutuelles des électrons qui le composent, soit, si cette divergence naturelle est insuffisante, de l'utilisation, par exemple, de champs magnétiques convenablement disposés [4].

e. Expression du rendement maximum. Condition d'accrochage. — Nous admettrons comme valeur du rendement l'expression suivante (*cf.* Annexes I et II) :

$$(5)\qquad W = pU_2J_1\left(\frac{lU_1}{2}pM\right) - \frac{A_f + A_p}{2}(U_1^2 + U_2^2),$$

qui, pour de petites valeurs des tensions U_1 et U_2, se réduit à

$$(6)\qquad W = \frac{1}{4}\left[p^2 lMU_1U_2 - \frac{A_f + A_p}{2}(U_1^2 + U_2^2)\right].$$

La symétrie de la formule en U_1 et U_2 montre que le maximum de rendement, au voisinage de l'accrochage, correspond à $U_1 = U_2$. En écrivant $W = 0$, on obtient ainsi pour la condition d'accrochage

$$(7)\qquad q = 4\frac{A_f + A_p}{p^2 lM} = 1.$$

Cette condition d'accrochage, qui définit une longueur d'onde limite pour le tube, ne doit pas être confondue avec la condition qui définit le courant d'accrochage dans un tube, dont on module le faisceau en densité (*voir* par exemple [13]), cette dernière condition étant relative à un tube réglé pour obtenir le maximum de puissance à la crête du courant électronique.

Lorsqu'on s'éloigne de la condition d'accrochage, q devenant inférieur à l'unité, le maximum du rendement en fonction de U_1 et U_2 s'obtient en annulant $\frac{\partial W}{\partial U_1}$ et $\frac{\partial W}{\partial U_2}$. U_1 et U_2 sont donc déterminés par les deux équations

$$(8)\qquad \begin{cases} \dfrac{\partial W}{\partial U_1} = \dfrac{p^2 lM}{2}U_2J'_1 - (A_f + A_p)U_1 = 0, \\ \dfrac{\partial W}{\partial U_2} = pJ_1 - (A_f + A_p)U_2 = 0, \end{cases}$$

$J'_1(x)$ désignant la dérivée de $J_1(x)$ par rapport à x. En exprimant U_2 en fonction de U_1 et U_1 par l'intermédiaire de $x = \frac{plM}{2}U_1$, les équations précédentes deviennent

$$(9)\qquad q^2 = 4\frac{J_1J'_1}{x}.$$

Cette équation détermine x en fonction du paramètre d'accrochage q. Le rendement correspondant aux conditions (8), vaut

$$(10)\qquad W = \frac{2}{Mlq}\left[J_1^2 - \frac{q^2}{4}x^2\right] = \frac{1}{Ml}f(q).$$

La fonction $f(q)$ est représentée sur la figure 4. Elle peut être développée de la façon suivante :

$$f(q) = 2\frac{J_1^2(1,84)}{q} - \frac{\overline{1,84}^2}{2}q + \ldots.$$

Lorsque q est petit, le rendement peut donc s'écrire

$$(11)\qquad W = \frac{0,67}{Mlq} = \frac{0,67p^2}{4(A_f + A_p)}.$$

Cette expression du rendement est valable tant qu'il n'apparaît pas de réflexion d'électrons dans le collecteur, c'est-à-dire tant que $U_1 + U_2 \leq U_m$,

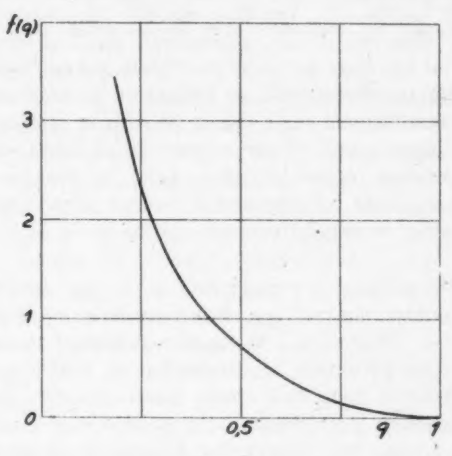


Fig. 4.

où U_m est une fonction de d. Quand on dépasse cette limite, les équations (8), qui déterminent les valeurs de U_1 et U_2 qui font le rendement maximum, sont remplacées par

$$(12)\qquad \begin{cases} U_1 + U_2 = U_m, \\ \dfrac{\partial W}{\partial U_1} + \dfrac{\partial W}{\partial U_2} = 0. \end{cases}$$

Nous ne discuterons pas ici ces équations en détail. En consentant à une erreur relative de quelques centièmes sur le rendement, nous pouvons remplacer U_2 par U_m dans le premier terme de (5) et $(U_1^2 + U_2^2)$ par U_m^2 dans le deuxième terme. D'autre part, la condition de non-réflexion, s'appliquant d'abord aux électrons qui passent au voisinage des fentes, on peut, pour des fentes étroites ($d \leq 1$) remplacer U_m par 1. La valeur maximum de $J_1(x)$ étant 0,58, la valeur maximum du rendement, limitée par la réflexion des électrons, s'écrit donc

$$(13)\qquad W = 0,58p - \frac{A_f + A_p}{2}.$$

Le passage de l'expression (11) à l'expression (13) se fait pour une valeur du rendement obtenue en égalant (11) et (13), c'est-à-dire pour

$$W = \frac{0,58p}{2}.$$

On peut donc distinguer trois régions dans l'étude du rendement : La première région est limitée d'une part, par la condition d'accrochage (7), $q = 1$, d'autre part, par la limite de validité de l'expression approchée (11), limite qui correspond à une valeur de q d'environ 0,25. Dans cette région, le degré de rassemblement x croît de zéro à une valeur voisine de 1,84, le rapport $\frac{U_2}{U_1} = \frac{2J_1(x)}{xq}$ croît de 1 à environ 2,5. Dans la deuxième région, qui correspond aux limites de validité de l'équation (11), le degré de rassemblement reste voisin de 1,84, la tension U_2 croît jusqu'à une valeur voisine de 1. Enfin, dans la troisième région [équation (13)], la tension U_2 et le degré de rassemblement restent sensiblement constants et respectivement voisins de 1 et 1,84.

f. Discussion du rendement et de la condition d'accrochage dans le cas d'une focalisation magnétique. — Dans ce cas le courant introduit dans le tunnel de glissement ne limite pas sa longueur, le paramètre α peut être choisi arbitrairement. Mais la discussion des effets de charge d'espace montre que le facteur Ml, ou le facteur Mk qui lui est proportionnel, passe en fonction de k, donc en fonction de α, par un maximum. Cette valeur correspond également au maximum du rendement puisque, toutes choses égales par ailleurs, elle diminue la puissance H. F. absorbée par le rassembleur. La longueur du tube de glissement est donc limitée dans ce cas par les effets de dégroupement longitudinal.

Une discussion complète des valeurs maxima du rendement et de la puissance en fonction des différents paramètres qui interviennent dans sa détermination serait très compliquée et conduirait d'ailleurs dans les deux cas à des valeurs différentes des paramètres. Par exemple, le rendement en fonction d'un seul paramètre b, passe par un maximum pour une certaine valeur de b, mais la puissance appliquée croissant, toutes choses égales d'ailleurs, comme b^2 le maximum de la puissance de sortie est obtenu pour une valeur de b nettement supérieure. On est conduit, en pratique, à faire un compromis entre ces deux conditions. L'examen de quelques cas particuliers montre qu'on est alors conduit pour b et d à des valeurs qui restent voisines de $b = 1,5$ et $d = 0,75$. Nous adopterons ces valeurs dans la suite de la discussion.

Nous tiendrons compte d'autre part du fait que le diamètre du faisceau ne peut être exactement égal au diamètre du tunnel de glissement et nous admettrons pour le calcul de p et de A_f que le diamètre du faisceau est en moyenne les trois quarts du diamètre du tunnel, ce qui donne $p^2 = 0,5$, $A_f = 0,15$, q se présente alors comme une fonction de λ et de I, divisée par Mk. Or, Mk (*cf.* Annexe II) passe pour $b = 1,5$, par un maximum égal à 3,8. En remplaçant Mk par cette valeur, q est finalement donné par l'expression

$$(14) \quad q = 0,0085\lambda^{\frac{3}{4}} I'^{\frac{1}{2}} + 0,110\left(1 + 2,45\lambda^{\frac{1}{4}}\right)\lambda^{-\frac{7}{4}} I'^{-\frac{1}{2}}.$$

La condition d'accrochage $q = 1$ définit la longueur d'onde limite de ce type de tube en fonction de la densité de courant I'. Le premier terme de q étant alors pratiquement négligeable, l'équation (14) montre que la longueur d'onde limite varie à peu près comme $I'^{-\frac{1}{2}}$. Pour diminuer la longueur d'onde limite il faut donc augmenter très considérablement la densité de courant à l'entrée du tube.

Dans le domaine où l'équation (11) est valable, W prend la forme

$$(15) \quad W = \frac{1}{1,79 + 23,4\left(1 + 2,45\lambda^{\frac{1}{4}}\right)\lambda^{-\frac{3}{2}} I'^{-1}},$$

expression qui montre que dans cette région, le rendement croît à peu près comme $\lambda^{\frac{9}{4}}$.

Le passage de l'expression (11) à l'expression (13) du rendement se fait pour $W = 0,20$. Dans cette nouvelle région, on a

$$(16) \quad W = 0,335 - 0,98\left(1 + 2,45\lambda^{\frac{1}{4}}\right)\lambda^{-\frac{5}{2}} I'^{-1},$$

et le rendement croît de plus en plus lentement depuis 0,20 jusqu'à sa valeur limite 0,335.

La figure 5 représente les variations du rendement en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de I'. $I' = 0,1$: A/cm² correspond à l'utilisation d'un faisceau parallèle issu d'une cathode plane de section un peu inférieure à celle du tunnel de glissement. $I' = 1$ A : cm² nécessite pratiquement l'emploi d'un canon électronique produisant un faisceau convergent. Enfin, $I' = \frac{10}{\lambda}$ correspond à la limitation imposée par la puissance dissipée maximum, cette valeur de I' conduit pour les petites longueurs d'onde à des densités de courant très élevées.

La figure 6 représente dans les mêmes conditions les valeurs de la puissance fournie par le tube.

g. Discussion du rendement et de la condition d'accrochage dans le cas d'une focalisation électrostatique. — Dans ce cas on est pratiquement limité

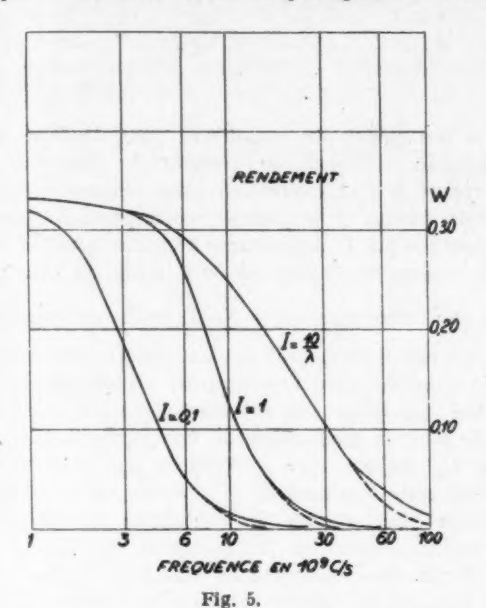


Fig. 5.

à une valeur de α d'environ 0,5. Pour cette valeur de α, M a une valeur voisine de 0,93, les effets de

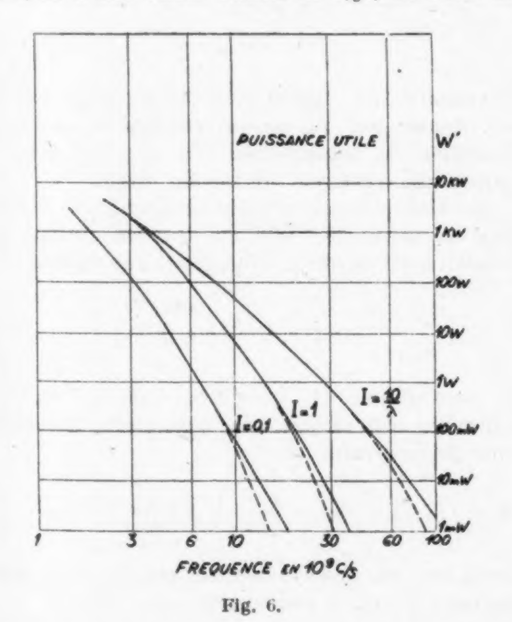


Fig. 6.

dégroupement longitudinal jouent donc dans ce cas un rôle peu important. La valeur de α étant ainsi fixée, il en résulte pour l la valeur maximum

$$l = 125\lambda^{-\frac{3}{4}} I'^{-\frac{1}{2}}.$$

Pour passer du cas de la focalisation magnétique au cas présent, il faut donc multiplier q par un facteur constant, qui représente le rapport des valeurs de Ml dans les deux cas. Ce rapport vaut 1,77. Par contre, qMl ne varie pas d'un cas à l'autre. Le rendement défini par les formules (11) et (13) ne change donc pas. Il faut cependant remarquer qu'avec une valeur de Ml plus petite, la tension U_1 nécessaire pour réaliser la condition $\frac{pMl}{2} U_1 = 1{,}84$ est plus élevée, ce qui entraîne une erreur plus importante dans l'application de la formule (13) et un rendement un peu plus faible pour le cas de la focalisation électrostatique dans le domaine des grandes longueurs d'onde.

Mais, c'est dans la région où la valeur elle-même de q intervient, c'est-à-dire au voisinage de la condition d'accrochage, que la différence est la plus marquée. Le courant d'accrochage est multiplié pour une longueur d'onde donnée par 1,77.

Sur les figures 5 et 6 on a représenté en trait interrompu les valeurs correspondant au cas de la focalisation électrostatique.

Conclusion.

Cette étude montre que, pour le type de tube envisagé, le rendement décroît rapidement quand la fréquence augmente en passant d'une valeur voisine de 30 % pour les grandes longueurs d'onde à une valeur nulle pour une longueur d'onde de quelques millimères. Il apparaît que la puissance H. F. peut dépasser le kilowatt, au delà d'une longueur d'onde d'environ 10 cm. Elle décroît très rapidement quand on augmente la fréquence en passant pour 3 cm, par une valeur de quelques watts.

L'analyse qui donne ces résultats suppose réalisées un certain nombre de conditions. Ce n'est évidemment que dans la mesure où l'on s'approche pratiquement de ces conditions qu'on peut espérer un bon accord entre la théorie et les faits expérimentaux. Des exemples seront fournis ultérieurement à ce propos au cours de la description d'un tube donnant une puissance élevée sur 10 cm de longueur d'onde.

Les différentes courbes qui donnent, en fonction de la fréquence, la puissance et le rendement, font apparaître l'importance capitale vers les courtes longueurs d'onde de la densité du courant électronique qui traverse le tube. On peut donc dire que,

vers les fréquences les plus élevées, le problème posé par la réalisation de ces tubes ne peut être résolu que par la mise au point d'un canon électronique particulièrement efficace.

ANNEXE I.

Calcul du rendement dans les tubes sans grilles.

Une étude plus détaillée des échanges d'énergie entre un faisceau électronique et un champ H. F. fera l'objet d'une publication ultérieure. Nous nous limiterons ici au cas particulier des tubes sans grilles. Nous considérerons un faisceau électronique de diamètre $2b$ circulant dans une électrode cylindrique de même diamètre, portée au potentiel V_0, et maintenu parallèle par un champ magnétique suffisamment intense. Les champs H. F. apparaissent par deux fentes identiques pratiquées dans l'électrode cylindrique.

D'une façon générale, quand les champs alternatifs sont petits, le rendement de conversion est donné par l'expression (14)

$$W_c = \frac{1}{4} \frac{\partial}{\partial \alpha}_{\alpha=1} \frac{\vec{F}.\vec{F}^*}{2},$$

en posant

$$\vec{F} = \int_{-\infty}^{+\infty} \vec{E}(z)\, e^{j\alpha z}\, dz.$$

Dans notre cas particulier, $\vec{E}(z)$ devra être limité à sa composante parallèle à Oz, que l'on peut écrire

$$\frac{U_1}{2} Z(z, r) + \frac{U_2}{2} Z(z - l, r)\, e^{j\varphi},$$

en appelant l la distance des centres des deux fentes et φ la différence de phase entre les deux champs. U_1 et U_2 représentant les tensions aux bornes des deux champs, c'est-à-dire que

$$\int_{-\infty}^{+\infty} Z(z, 0)\, dz = 1,$$

cette relation étant valable quel que soit r, tant que le diamètre du tube est petit vis-à-vis de la longueur d'onde, ce que nous supposons ici.

En posant

$$\zeta(r) = \int_{-\infty}^{+\infty} Z(z, r)\, e^{jz}\, dz,$$

$$\zeta'(r) = -\frac{\partial}{\partial \alpha}_{\alpha=1} \int_{-\infty}^{+\infty} Z(z, r)\, e^{j\alpha z}\, dz,$$

quantités qui sont réelles pour des champs symétriques, le rendement de conversion pour un pinceau à la distance r de l'axe s'écrit

$$W_c = -\frac{1}{4}\left[(U_1^2 + U_2^2)\zeta\zeta' + 2 U_1 U_2 \zeta\zeta' \cos(l + \varphi) + U_1 U_2 \zeta^2 l \sin(l + \varphi)\right].$$

Le rendement de conversion pour l'ensemble du faisceau s'obtient en prenant la moyenne par rapport à r. L'expression ainsi obtenue comporte trois termes : le premier correspond à l'énergie absorbée par la composante continue à sa traversée du champ et montre que le faisceau est équivalent à une admittance $A_f = \frac{\overline{\zeta\zeta'}}{2}$, le troisième représente l'échange d'énergie de la composante fondamentale du faisceau avec le champ du collecteur, on voit ainsi que pour cet échange d'énergie aussi bien que pour la modulation de vitesse, les tensions U_1 et U_2 doivent être multipliées par le coefficient d'efficacité longitudinal ζ. Lorsque la phase φ est réglée pour rendre le rendement maximum, le deuxième terme est pratiquement négligeable.

Ayant ainsi interprété les deux termes importants, la formule précédente se transforme aisément pour le cas où l'on s'éloigne des conditions d'accrochage, on peut alors écrire

$$W_c = U_2 \overline{\zeta J_1\left(\frac{l U_1 \zeta}{2}\right)} - \frac{A_f}{2}(U_1^2 + U_2^2).$$

Ce résultat est valable pratiqnement tant que U_2 ne dépasse pas V_0, ce qui est imposé ici par la condition de non-réflexion des électrons périphériques qui traversent un champ étroit.

Nous simplifierons un peu ce résultat en remplaçant la valeur moyenne du deuxième terme, qui conduit à des calculs pénibles par la valeur approchée

$$\sqrt{\overline{\zeta^2}}\, J_1\left(\frac{l U_1 \sqrt{\overline{\zeta^2}}}{2}\right).$$

Si nous appelons A_p l'admittance shunt à la résonance des deux cavités, nous obtiendrons finalement pour le rendement total

$$W = p\, U_2 J_1\left(\frac{l U_1 p}{2}\right) - \frac{A_f + A_p}{2}(U_1^2 + U_2^2) \qquad (p^2 = \overline{\zeta^2}).$$

Le champ est donc caractérisé par les deux paramètres p et A_f. Si l'on suppose connu

$$\zeta(b, \alpha) = \int_{-\infty}^{+\infty} Z(z, b)\, e^{j\alpha z}\, dz,$$

on sait qu'on peut écrire, d'après l'intégrale de Fourier,

$$Z(z, b) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \zeta(b, \alpha)\, e^{j\alpha z}\, d\alpha.$$

Il en résulte pour $Z(z, r)$, qui doit satisfaire à l'équation de Laplace, l'expression

$$Z(z, r) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \zeta(b, \alpha) \frac{I_0(\alpha r)}{I_0(\alpha b)} e^{j\alpha z}\, d\alpha,$$

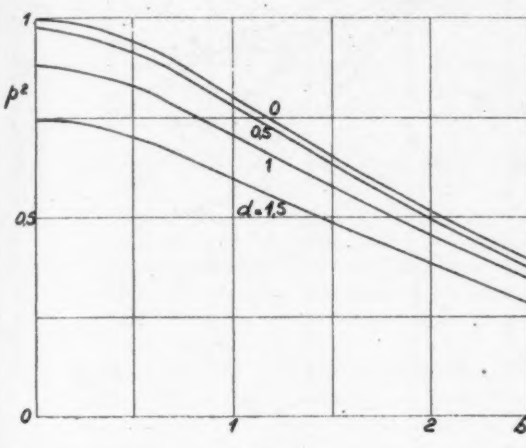


Fig. 7.

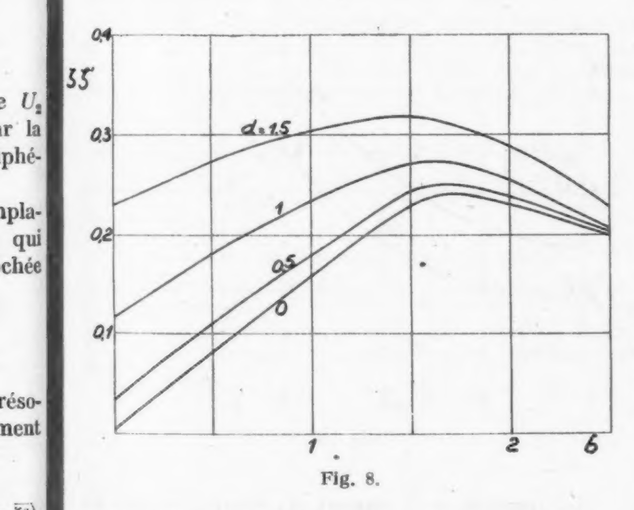


Fig. 8.

qui montre immédiatement que

$$\zeta(r, \alpha) = \zeta(b, \alpha) \frac{I_0(\alpha r)}{I_0(\alpha b)},$$

$\zeta(b, \alpha)$ dépend en toute rigueur de la forme complète de la cavité, *et en particulier des becs qui matérialisent la fente.* On peut avec Wang [10] faire l'hypothèse simple que le champ entre les becs est uniforme, ce qui conduit à

$$\zeta(b, \alpha) = \frac{\sin \alpha \frac{d}{2}}{\alpha \frac{d}{2}}.$$

Si la fente est très étroite, et sépare deux cylindres infiniment minces, la répartition du champ est la même qu'entre deux demi-plans coplanaires et séparés par une fente de largeur d, on a alors

$$\zeta(b, \alpha) = J_0\left(\alpha \frac{d}{2}\right).$$

Nous adopterons cette deuxième forme qui semble en général plus proche de la répartition réelle de champ, telle qu'on peut, par exemple, la déterminer à la cuve électrolytique, que la forme adoptée par Wang et nous utiliserons dans le calcul du rendement les valeurs suivantes de $\overline{\zeta\zeta'}$ et p^2,

$$p^2 = J_0^2\left(\frac{d}{2}\right)\left[1 - \frac{I_1^2(b)}{I_0^2(b)}\right],$$

$$\overline{\zeta\zeta'} = \frac{d}{2} J_0\left(\frac{d}{2}\right) J_1\left(\frac{d}{2}\right)\left[1 - \frac{I_1^2(b)}{I_0^2(b)}\right] + J_0^2\left(\frac{d}{2}\right)\left[b \frac{I_1(b)}{I_0(b)}\left(1 - \frac{I_1^2}{I_0^2}\right) - \frac{I_1^2}{I_0^2}\right].$$

Les figures 7 et 8 montrent les variations de ces deux facteurs en fonction de b pour diverses valeurs de d.

ANNEXE II.

EFFETS DE LA CHARGE D'ESPACE SUR LE DÉGROUPEMENT LONGITUDINAL DANS LES TUBES SANS GRILLES.

Ces effets de dégroupement dépendent des diamètres du faisceau et de l'électrode métallique qui l'entoure. Pour un diamètre de faisceau donné, ils sont d'autant plus petits que l'électrode est plus près du faisceau. Nous nous placerons dans le cas le plus favorable, cas où le faisceau a même diamètre que l'électrode qui l'entoure.

Nous ne ferons ici qu'une estimation de ces effets, à partir du cas relativement simple où les composantes alternatives sont petites par rapport aux composantes continues, renvoyant pour une étude plus complète à une publication ultérieure.

Dans le cas où les grandeurs alternatives sont petites devant les grandeurs continues correspondantes, on peut utiliser les résultats des études de Hahn [11] et Ramo [12]. On a alors à considérer les deux ondes de charge d'espace associées dont

les coefficients de propagation sont, en première approximation, données par

$$\gamma = \gamma_0[1 \pm \delta_n],$$

où

$$\gamma_0 = \frac{\omega}{v_0} \qquad \text{et} \qquad \delta_n = \frac{\Omega}{\omega} \frac{b}{\sqrt{x_n^2 + b^2}}.$$

Ω étant la pulsation propre du plasme électronique de même densité que le faisceau considéré

$$\Omega = 3,26 . 10^9 I'^{\frac{1}{2}} V^{-\frac{1}{4}},$$

et x_n la $n^{\text{ième}}$ racine de $J_0(x) = 0$.

En associant ces deux ondes, on obtient ainsi pour la distribution des vitesses et des densités

$$v = \sum_n \sum_1^\infty v_n \cos \delta_n z J_0\left(x_n \frac{r}{b}\right) \sin(t - z),$$

$$\rho = \sum_n \sum_1^\infty \frac{v_n}{\delta_n} \sin \delta_n z J_0\left(x_n \frac{r}{b}\right) \cos(t - z).$$

Cette onde présente en $z = 0$, une modulation de densité nulle et une modulation de vitesse qui doit coïncider avec celle donnée dans l'Annexe I,

$$v = \frac{U_1}{2} \frac{I_0(r)}{I_0(b)} f(d);$$

on détermine aisément les coefficients v_n à partir de l'identité

$$\frac{I_0(r)}{I_0(b)} = \sum_1^\infty A_n J_0\left(x_n \frac{r}{b}\right),$$

avec

$$A_n = \frac{2 x_n}{(x_n^2 + b^2) J_1(x_n)}.$$

A la traversée du deuxième champ, ρ doit être multiplié par le coefficient d'efficacité

$$f(d) \frac{I_0(r)}{I_0(b)},$$

ce qui conduit finalement, en faisant la moyenne sur la section du faisceau, à un terme

$$\frac{U_1 U_2}{4} \overline{f(d)}^2 \sum_n \sum_1^\infty A_n^2 J_1^2(x_n) \sin \frac{\delta_n l}{\delta_n}$$

qui, en l'absence de charge d'espace, vaut

$$\frac{U_1 U_2}{4} \overline{f(d)}^2 \left[1 - \frac{I_1^2(b)}{I_0^2(b)}\right].$$

On peut donc tenir compte de la charge d'espace, en introduisant dans la formule précédente un coefficient M, inférieur à l'unité et qui s'écrit

$$M = \sum_n \sum_1^\infty \frac{4 x_n^2}{(x_n^2 + b^2)^2} \frac{\sin(\delta_n l)}{\delta_n l} \frac{1}{1 - \frac{I_1^2(b)}{I_0^2(b)}}.$$

Il est intéressant d'introduire la densité de courant en la comparant à celle que permet la focalisation électrostatique dans un tube de diamètre $2b$ et de longueur l. Le courant maximum qui peut traverser un tel tube est

$$i_0 = 4,88 \frac{b^2}{l^2} V_0^{\frac{3}{2}}.$$

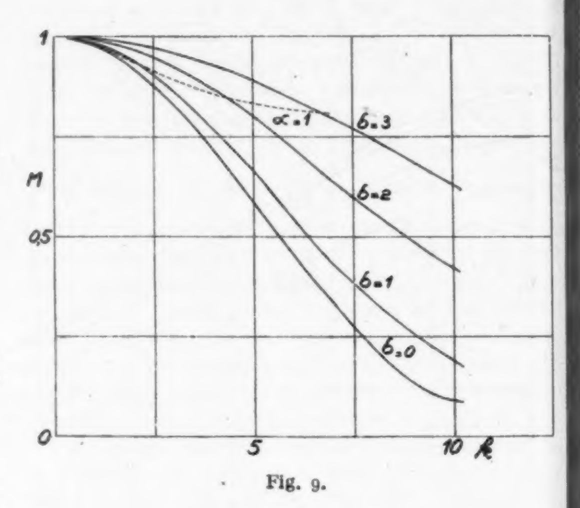


Fig. 9.

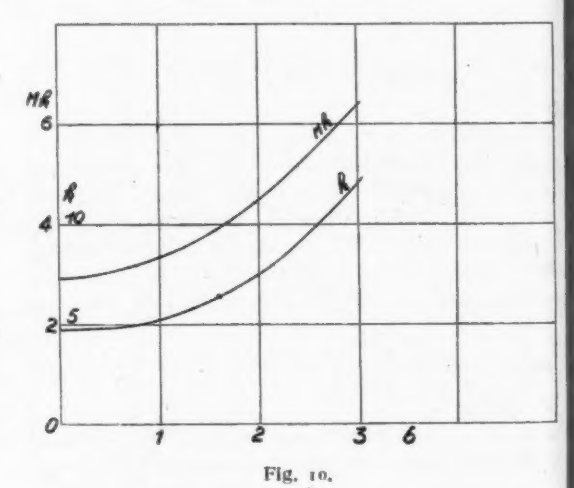


Fig. 10.

En appelant α le rapport du courant utilisé au courant limite précédent et en posant

$$k = \frac{\Omega}{\omega} lb,$$

k est relié à α et b par

$$k = 2,2 \alpha^{\frac{1}{2}} b,$$

M est alors une fonction de b et K qui est représentée sur la figure 9 en fonction de k pour différentes valeurs de b.

Dans l'étude du rendement apparaît le facteur Mk, ce facteur est une fonction de k qui passe par un maximum donné en fonction de b par la figure 10, sur laquelle on a également porté en fonction de b la valeur de k qui rend Mk maximum.

Une étude plus complète dont l'exposé déborderait le cadre du présent travail montre qu'on peut tenir compte d'une façon approchée des effets de dégroupement, lorsque les composantes alternatives ne sont pas petites par rapport aux composantes continues, en remplaçant dans l'expression de la composante fondamentale du courant I par MI, M étant identique au facteur précédemment défini.

BIBLIOGRAPHIE.

1. R. Warnecke, J. Bernier et P. Guénard, *Groupement et dégroupement au sein d'un faisceau cathodique injecté dans un espace exempt de champs extérieurs après avoir été modulé dans sa vitesse* (*Journal de Physique*, mai et juin 1943).
2. R. Warnecke et J. Bernier, *Contribution à la théorie des tubes à commande par modulation de vitesse et autres tubes à temps de transit* (*Revue générale de l'Électricité*, janvier et février 1942 et *Erratum*, octobre 1942).
3. R. Warnecke, *Sur quelques conceptions nouvelles dans les domaines de la Physique et de la technique des tubes émetteurs pour les fréquences très élevées* (*Annales de la Radiodiffusion*, janvier 1944).
4. R. Warnecke, *Contribution à la Physique et à la technique des tubes électroniques d'émission dits à modulation de vitesse* (*Annales de Radioélectricité*, juillet 1945).
5. R. Warnecke, *Sur quelques réalisations modernes et sur quelques conceptions récentes de tubes électroniques pour la réception et l'émission des ondes électromagnétiques ultra-courtes* [*Bulletin de la Société française des Électriciens* (sous presse)].
6. P. Guénard, *Effet de lentille des champs alternatifs dans les tubes à modulation de vitesse* (*Annales de Radioélectricité*, avril et juillet 1946).
7. P. Guénard, *Sur la possibilité d'une focalisation purement électrostatique dans un tube à modulation de vitesse à conversion par glissement* (*Annales de Radioélectricité*, juillet 1945).
8. P. Guénard, *Répartition du potentiel dans un faisceau électronique cylindrique* (*Journal de Physique*, mars 1945).
9. J. Bernier, *Thèse de Doctorat*, 9 juin 1944.
10. C. C. Wang, *Electromagnetic field inside a cylinder with a gap* (*Journal of Applied Physics*, juin 1945).
11. W. C. Hahn, *Small signal theory of velocity modulated electron beams* (*General Elec. Rev.*, juin 1939).
12. S. Ramo, *Space charge and field waves in electron beams* (*Physical Review*, 1er août 1939).
13. J. Bernier, P. Guénard et M. Lortie, *Étude théorique du klystron auto-oscillateur* (*Bulletin de la Société française des Électriciens*, février 1944).

LE VERRE DANS L'INDUSTRIE RADIOÉLECTRIQUE

PAR FRÉDÉRIC VIOLET,

Chef du Laboratoire de Recherches Physico-Chimiques
de la Compagnie Générale de Télégraphie sans fil.

ANDRÉ DANZIN,

Ancien élève de l'École Polytechnique,
Chef d'une Section de Recherches au Laboratoire de Recherches Physico-Chimiques
de la Compagnie Générale de Télégraphie sans fil.

ANDRÉ COMMIN,

Chef de la Section Constructions au Laboratoire de Recherches Physico-Chimiques
de la Compagnie Générale de Télégraphie sans fil.

SOMMAIRE. — *Évolution de la technique du verre dans l'industrie radioélectrique et plus particulièrement dans les ateliers et laboratoires des Compagnies françaises associées de T. S. F. durant ces dix dernières années.*

Comment une technique scientifique a remplacé progressivement les procédés empiriques artisanaux.

Description d'un procédé pratique de fabrication en série de pieds de lampes avec élimination de toute main-d'œuvre spécialisée.

Introduction.

Cette étude comprenant trois parties assez longues, nous croyons utile de résumer brièvement sa teneur.

Il y a dix ans, alors que les problèmes posés par la fabrication des lampes et tubes de radio étaient traités scientifiquement, tout ce qui concernait leur verrerie restait livré à l'empirisme le plus complet.

La création d'un laboratoire spécialisé s'imposait donc et d'une façon d'autant plus urgente que l'importance des déchets rendait indispensable un redressement très rapide. La tâche du nouvel organisme s'annonçait donc fort délicate dès sa naissance puisqu'on exigeait de lui des résultats pratiques immédiats, alors que l'élaboration de méthodes rationnelles supposait des recherches de longue haleine et leur mise en œuvre un bouleversement complet de l'organisation des ateliers.

On décida de parer au plus pressé en corrigeant, dans le cadre des méthodes d'alors, tout ce qui pouvait être redressé par une analyse scientifique rapide, sans toucher pour le moment aux principes, puis d'entreprendre les recherches générales devant permettre dans la suite de fonder des méthodes industrielles modernes sur des principes nouveaux.

Un examen rapide permit de voir qu'à peu près tous les accidents provenaient d'un mauvais recuit, d'une fusion insuffisante du verre pendant son travail, d'un écart excessif entre les dilatations du verre et des passages et de défauts d'adhérence entre verre et passages.

On put donner rapidement des consignes pour améliorer le recuit et en contrôler la qualité à l'atelier même à l'aide de tests fournis par le Laboratoire, l'élimination des défauts de fusion était une simple question de contrôle du travail. Aussitôt que les remèdes ainsi préconisés furent effectivement appliqués, la proportion des déchets diminua très sensiblement et la première partie de la tâche étant remplie, les études plus générales furent enfin entreprises.

Leur premier objet fut la dilatation; les méthodes empiriques de repérage furent d'abord remplacées par des mesures au dilatomètre dans les conditions suggérées par la pratique des recuits, puis l'examen critique des courbes obtenues, appuyé sur de nouvelles expériences, permit de se dégager progressivement de tout empirisme et d'interpréter la signification des points et paramètres remarquables après normalisation des conditions d'essai.

Le premier résultat pratique fut la création de cahiers des charges pour les verres auxquels les fournisseurs furent mis en mesure de faire face par l'assistance technique du laboratoire et dont l'application élimina pratiquement tous les accidents dus jusque-là aux dilatations.

On put ensuite mettre en évidence la nécessité d'accorder la dilatation du passage et celle du verre, de sorte que celui-ci soit en compression à la température ordinaire, l'absence totale d'efforts étant tolérable dans le cas de petits diamètres, ce qui éclaira et précisa la vieille loi empirique « qu'il faut utiliser des verres un peu moins dilatables pour les grosses lampes »; enfin l'étude systématique de l'accrochage du verre sur le passage permit de comprendre l'évolution des efforts observés dans un joint à la température ordinaire, en fonction du recuit.

Une autre série de recherches fut orientée sur les phénomènes d'adhérence entre verre et passage au niveau de la soudure, on justifia l'emploi en première approximation des tests colorés, la signification profonde du phénomène étant maintenant étudiée par diffraction des électrons au niveau de la couche de passage. L'électrolyse du verre se traduisant par une rupture de l'adhérence au niveau des électrodes faisait partie du même groupe et son étude, qui se poursuit toujours, permit de préciser sa liaison avec la composition du verre et avec la température pour une composition donnée. Enfin l'attaque chimique des joints depuis l'extérieur et par la couche de passage fit l'objet d'études systématiques qui permirent de classer les résistances des différents passages et de mettre en œuvre des procédés de protection pour les plus attaquables.

Aussitôt que les recherches décrites furent suffisamment avancées, la mise au point de procédés modernes fut entreprise. On donne en exemple les toutes premières réalisations afin de fixer l'orientation générale des efforts et on conclut enfin cette présentation par une vue d'ensemble des recherches en cours.

Il est maintenant possible d'aborder la genèse des méthodes actuelles; on commencera par l'étude générale des verres modernes et de leurs procédés de mise en œuvre.

De multiples modes de façonnage du verre sont connus depuis une époque très lointaine pour la fabrication d'objets d'usage domestique, industriel, de produits de luxe, etc.

Un examen schématique de ces procédés, qui laisse de côté l'étirage utilisé en glacerie, conduit à distinguer les différents soufflages à la canne, le pressage et le travail au chalumeau. La taille et le polissage par abrasifs permettent la réalisation de pièces de cotes géométriques extrêmement précises et présentant un grand fini de surface.

La décoration par émaux ou par peintures métalliques, la gravure par voie chimique, le verre craquelé, l'opale, etc., sont autant de techniques différentes dont on attend généralement un effet artistique mais qui peuvent recevoir des applications industrielles.

Le façonnage à chaud est généralement suivi d'une recuisson destinée à éliminer les efforts internes.

La trempe confère au verre des qualités mécaniques particulières.

Le verre entre pour une part importante dans la construction des lampes de T. S. F. où il joue le rôle d'isolant et d'enveloppe étanche. Des problèmes spéciaux se trouvent ici posés aux verriers; le verre doit en effet conserver les qualités recherchées dans ses emplois courants et en outre présenter de bonnes qualités électriques. Il est nécessaire de souder commodément avec une grande précision géométrique le verre à des métaux conducteurs qui font communiquer les électrodes des tubes à vide avec l'extérieur. Ces scellements verre-métal doivent être robustes aux chocs mécanique et thermique et donner toute garantie d'étanchéité au vide.

Les exigences de fabrication des pièces de verre et des scellements sur le métal ne doivent pas entraver la liberté du radioélectricien dans la disposition géométrique des électrodes.

A la suite d'études nombreuses, on dispose maintenant d'une gamme assez étendue — mais imparfaite — de métaux soudant aux verres et l'on sait enrober le métal par le verre sous différentes formes en utilisant des modes de chauffage multiples.

Une étude de ce laboratoire entreprise avec la collaboration des Cristalleries de Baccarat a permis d'éclairer la question de la variation des propriétés physiques des verres en fonction de leur composition chimique. On a pu aboutir à la mise au point de verres qui, bien adaptés à tous les modes de façonnage habituels, cumulent une somme de qualités

réputées jusqu'ici inconciliables : basse dilatation, stabilité chimique comparable à celle des meilleurs verres connus, bonnes qualités mécaniques, insolubilité, résistivité très élevée, pertes diélectriques faibles.

A côté de cet effort sur les qualités propres des verres, les recherches ont eu pour objet de perfectionner les procédés de construction, soit en transportant dans le domaine de la verrerie radio des modes de façonnage déjà connus mais inappliqués dans notre industrie, soit en imaginant des procédés nouveaux qui utilisent en général l'énergie électrique comme moyen de chauffage.

Le développement de la fabrication de pièces tubulées par soufflage à l'air comprimé, l'étude de machines semi-automatiques et automatiques pour la fabrication d'enrobages, de pieds de lampes et de certaines pièces de forme ont permis d'atteindre des précisions géométriques rigoureuses en même temps que l'on donnait à nos ateliers de verrerie un caractère industriel et non plus artisanal comme autrefois.

Le problème de la fermeture des tubes à vide a été spécialement étudié. On sait qu'il s'agit du scellement verre-verre ou verre-métal qui permet de refermer définitivement l'enveloppe sur le montage des électrodes. Ce scellement doit être pratiqué en présence d'organes chimiquement très fragiles situés à très faible distance de la zone de soudure. Différents procédés permettent aujourd'hui d'opérer la fermeture avec une garantie totale de préservation du montage.

Ces perfectionnements apportés aux procédés de fabrication, s'ajoutant aux résultats obtenus en agissant sur la composition chimique des verres, permettent au radioélectricien, au moins dans le domaine des ondes supérieures aux ondes centimétriques, de considérer le verre comme un isolant satisfaisant et lui laissent une large liberté de conception pour la forme et la précision des cotes demandées à la verrerie employée dans les tubes à vide.

Nous conclurons enfin maintenant notre exposé par la description d'un procédé pratique de fabrication en série qui a déjà fait ses preuves dans nos ateliers.

Cette étude a été entreprise dans le but de réaliser différents types de pieds de lampes par des moyens mécaniques simples et susceptibles de s'adapter à des productions de petites et moyennes séries en éliminant toute main-d'œuvre spécialisée.

Nous exposerons d'abord les principales caractéristiques de ces pieds, puis après description de la méthode de pressage, nous examinerons le dosage de l'apport de verre, l'étanchéité des soudures verre-métal et le problème délicat des calcinures, défaut propre aux fabrications de pièces en verre pressé.

Nous examinerons ensuite un type de machine destinée à la fabrication de ces pieds, puis les différentes pièces d'apport de verrerie ainsi que les machines employées à leur fabrication et l'utilisation de ces pièces selon les verres employés et les différentes formes de pieds.

Enfin nous verrons le problème de la recuisson des pieds en verre pressé, puis l'avantage qu'ils présentent pour le culottage des lampes terminées et quelques renseignements particuliers sur l'exploitation du procédé.

PREMIÈRE PARTIE.

Dix ans d'efforts pour reculer les limites imposées aux performances des lampes et tubes par la nature vitreuse de leurs enveloppes.

Les radioélectricien sont longtemps utilisé le verre sans chercher d'autres renseignements sur ses propriétés que ceux puisés dans l'expérience des spécialistes du soufflage qui abondent dans nos usines.

Cette méthode qui compte encore de nombreux adeptes a permis d'utiliser, en évitant les principaux écueils, une matière exigeant de toute évidence des précautions spéciales dont le secret paraissait détenu par un petit nombre d'initiés.

A condition de s'en remettre aveuglément à ces augures, on arrivait à obtenir des fabrications de petite série dans des ateliers où le travail à la main dominait, ce qui suffisait aux besoins de la production courante, tandis que les tours de force d'habileté dont sont capables les meilleurs souffleurs faisaient la joie des chercheurs en mal de montages compliqués. Il va sans dire que ces chefs-d'œuvre ne pouvaient être produits en série.

La régularité des fabrications en atelier était recherchée en contrôlant la reproduction aussi exacte que possible de chaque opération, mais ce n'était qu'une codification de l'empirisme, bien des variables restaient inconnues et par conséquent sans contrôle, d'où l'apparition inopinée de séries noires qui disparaissaient de façon aussi imprévisible et dont le rythme fantasque justifiait l'opinion générale que le verre jouissait du fâcheux privilège d'échapper à tout contrôle scientifique.

Cette réputation faite à un constituant essentiel des tubes à vide risquait d'entraver gravement le progrès, car le préjugé selon lequel les limites imposées

aux possibilités de construction comme aux performances étaient instables et mal définies stérilisait d'avance maint effort d'innovation.

Une étude approfondie des propriétés du verre s'imposait donc pour se dégager de l'empirisme et introduire des méthodes scientifiques de travail dans ce fief de l'habileté manuelle, du tour de main et du secret.

Un sujet aussi vaste et n'offrant que peu de possibilités de documentation en dehors de l'expérience ne pouvait être traité que par une équipe de chercheurs dirigés par un spécialiste éminent.

M. de Freminville, qu'un long passé verrier avait enrichi de l'expérience indispensable, fut le chef et l'animateur de cette équipe dont il avait réuni les premiers éléments dès 1935; à la même époque il définissait les grandes lignes du programme :

Tout d'abord améliorer très rapidement le rendement des fabrications existantes. On ne pouvait donc songer à concentrer tous les efforts sur une étude générale en vue du remplacement radical des errements en honneur par une technique moderne; c'est au contraire par l'étude des méthodes d'alors qu'il fallait commencer, leur analyse scientifique devant suggérer des améliorations immédiates et permettre de séparer la part d'observation expérimentale correcte, précieuse en tout état de cause, de celle d'interprétation routinière à éliminer des techniques futures.

Parallèlement, on s'efforcerait de préparer l'avenir par des recherches de longue haleine sur les propriétés des verres orientées vers des solutions industrielles modernes et au besoin révolutionnaires, mais dégagées de tout souci de succès rapides.

Pour donner une vue exacte des travaux poursuivis d'après ce programme, il importe de faire le point des procédés en usage à leur origine.

Procédés anciens de fabrication.

La partie de la fabrication des lampes et tubes intéressant la verrerie pouvait à cette époque être schématisée comme suit (*fig.* 1, 2, 3).

La lampe se compose essentiellement d'une ampoule A de forme et de dimensions variables, et d'un ou plusieurs « pieds » P soudés à cette ampoule, qui supportent les électrodes et permettent leur liaison électrique avec les circuits extérieurs par des traversées métalliques étanches; un queusot Q permet de faire le vide dans l'enceinte. Dans certains cas, des « sorties » S traversent directement le corps de l'ampoule, ce sont des traversées métalliques étanches qui n'ont pu être logées dans les pieds. Enfin dans le cas des lampes de grande puissance, l'anode est un cylindre de cuivre étanche C direc-

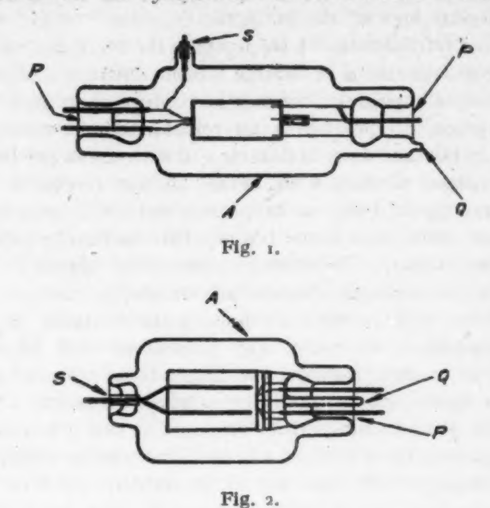


Fig. 1.

Fig. 2.

tement soudé à l'ampoule face au pied qui supporte les autres électrodes.

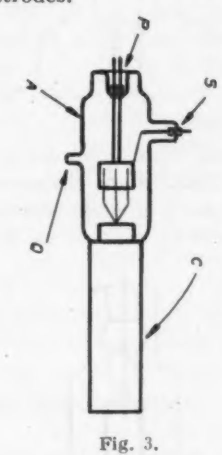


Fig. 3.

Les pieds (*fig.* 4, 5) sont fabriqués entièrement à la main, les tiges métalliques destinées à servir

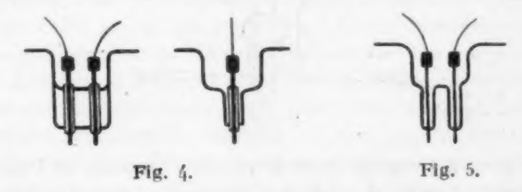


Fig. 4. Fig. 5.

de passages étanches sont enrobées sur une petite partie de leur longueur dans un verre spécial qui est à son tour soudé au corps du pied, lui-même

façonné d'avance à la main à partir de tube; un pied comporte en général plusieurs passages, comme on peut le voir sur la figure.

Un refroidissement trop rapide du verre qui vient d'être travaillé à la flamme faisant naître des efforts internes capables d'amener la rupture spontanée de la pièce, on procède à un refroidissement ménagé en la laissant dans la flamme qui est rendue progressivement de moins en moins chaude (recuit à la flamme), ou bien on la plonge dans une enceinte close maintenue à une température suffisante qu'on laisse ensuite redescendre lentement jusqu'à la température ambiante (recuit en étuve). Les pièces froides sont passées au polariscope d'atelier pour élimination de celles qui présentent des efforts résiduels trop violents; cet appareil ne permet que des appréciations qualitatives assez grossières.

La soudure du pied à l'ampoule se fait à la main pour les grosses lampes, à la machine pour les petites; dans le premier cas (*fig.* 6), le bord du pied et le

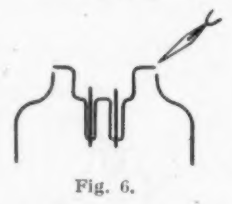


Fig. 6.

bord de l'ampoule étant rapprochés, leur soudure est réalisée à l'aide d'un chalumeau à flamme fixe que l'on déplace progressivement tout autour du cercle de contact; dans le second cas (*fig.* 7)

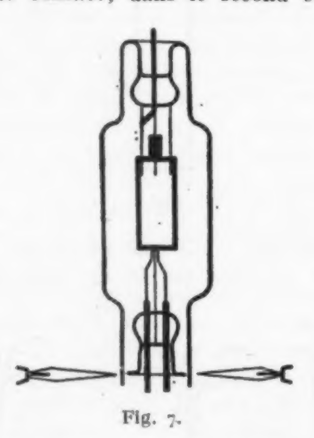


Fig. 7.

le pied est engagé dans le col de l'ampoule et l'ensemble tourne devant des flammes réglées en face du bord du pied, le verre du col se ramollit et se soude à celui du pied, tandis que la partie superflue qui se trouve au-dessous tombe par gravité.

Cette opération, qu'on appelle « fermeture », ne peut être suivie que d'un recuit à la flamme, et encore extrêmement sommaire, car le montage interne de la lampe est alors obligatoirement en place et les électrodes ne supportent pas une forte élévation de température à l'air.

Aussitôt refroidie, la lampe peut être « pompée », on la relie alors au groupe de pompage par l'intermédiaire du queusot et le pompage terminé, celui-ci est « coupé » aussi court que possible avec un chalumeau à dard très fin; c'est ici la proximité immédiate de l'ampoule qui impose un recuit extrêmement sommaire.

Enfin, pour souder une ampoule à un cylindre de cuivre, le bord de celui-ci est aminci puis enrobé dans un verre spécial, on l'approche alors de l'ampoule et la soudure verre sur verre est faite, les deux pièces tournant ensemble devant des flammes; un recuit à la flamme très prolongé termine l'opération.

Les accidents et leurs causes.

Les principaux accidents étaient des fêlures le long des enrobages, dans les fermetures et au queusot ainsi que des fuites par décollement entre métal et verre d'enrobage, ou entre celui-ci et le verre du pied. Tous ces accidents se produisaient aussi bien en cours de fabrication qu'au stockage en magasin ou, ce qui était le plus grave, après quelque temps de fonctionnement correct.

Les fêlures dans la masse du verre (fermetures, queusots) étaient dues à un mauvais recuit, celles le long des passages à la même cause ou à un mauvais accord de dilatation entre verre et métal, les décollements entre verre d'enrobage et verre du pied à une fusion insuffisante; quant aux décollements entre verre d'enrobage et passages, ils étaient dus à la disparition d'un oxyde particulier du métal dont la solution rapide dans le verre assure normalement l'étanchéité du joint.

Étude rapide du recuit et améliorations immédiates.

Le recuit du verre est rendu nécessaire par sa mauvaise conductibilité thermique jointe à sa relative fragilité; lorsqu'on laisse refroidir rapidement du verre ramolli, la température des couches externes baisse beaucoup plus vite que celle des couches internes, elles sont donc solides les premières et empêchent les couches internes d'achever leur contraction; les couches externes sont alors

comprimées par les couches internes et par voie de conséquence les couches internes tendues par les couches externes qui leur imposent un volume plus grand que celui qu'elles auraient occupé sans contrainte. Le verre étant fragile, ces efforts internes peuvent amener des ruptures, soit immédiatement, soit à la longue par un phénomène de fatigue.

Le verre qui est isotrope dans les conditions normales devient biréfringent dès qu'il est tendu ou comprimé, à la façon d'un cristal uniaxe positif s'il est tendu, négatif s'il est comprimé, mais dont l'axe est toujours parallèle à la direction de l'effort, la biréfringence étant une fonction mesurable de l'effort appliqué, on dispose ainsi d'un moyen de mesure des efforts internes dans une pièce de verre.

Un polarimètre et un compensateur à compression ont permis de mesurer rapidement les efforts limites tolérables, au-dessous desquels le risque de casse spontanée devient négligeable avec les verres employés.

Au sein d'une masse de verre, une zone comprimée est toujours accompagnée d'une zone tendue et *vice versa*, ce qui fait qu'aucune distinction pratique n'est possible, le verre casse toujours pour le même effort sans qu'on sache si c'est la tension ou la compression qui en est responsable. Au niveau d'un passage métallique au contraire, seuls sont visibles les efforts subis par le verre et l'on vérifie la loi bien connue que les tensions sont de si loin les plus dangereuses que dans la majorité des cas on n'a à se préoccuper que d'elles (le verre casse pour une tension de 10 à 25 fois inférieure à la compression susceptible de le rompre).

Les efforts limites déterminés, il devenait facile de contrôler les fabrications, on arriva très vite en fait aux conclusions suivantes *relatives aux zones non immédiatement voisines des métaux enrobés* :

Les pièces recuites en étuve sont généralement toutes bonnes ou toutes mauvaises;

Celles recuites à la flamme ne sont que très rarement parfaites, mais la qualité s'échelonne de façon continue entre le très acceptable et le fort mauvais;

Les queusots sont presque toujours très mauvais.

Les mauvaises séries dans le cas du recuit en étuve étaient dues à un mauvais réglage de la température, on élimina facilement le défaut en munissant chaque étuve d'un pyromètre individuel périodiquement comparé aux étalons du Laboratoire.

Pour le recuit à la flamme on ne put mieux faire que de recommander aux souffleurs de soigner particulièrement cette opération et de ne pas livrer de pièces dont les efforts dépasseraient ceux d'une pièce-type choisie par le Laboratoire après mesure polarimétrique; de telles pièces étaient déposées auprès du polariscope d'atelier et les comparaisons faites sur place par l'ouvrier fabriquant la pièce. On reconnut rapidement que l'usage d'accepter des efforts plus grands dans les pièces recuites sur machines rotatives était parfaitement fondé, le verre résistant beaucoup mieux à des efforts régulièrement distribués.

La violence des efforts dans les queusots était due au caractère nécessairement sommaire de leur recuit, on améliora un peu les choses en diminuant autant que faire se pouvait leur épaisseur, mais les accidents étaient encore fréquents; ne pouvant donc diminuer suffisamment la valeur des efforts, on se contente de les égaliser par l'artifice suivant : en même temps qu'on « coupe » le queusot, on chauffe au rouge un petit capuchon d'amiante avec lequel on coiffe le queusot aussitôt qu'il sort de la flamme, le refroidissement est encore trop rapide pour qu'il y ait un vrai recuit, mais il se fait en vase clos à l'abri de toute perturbation thermique, il en résulte que les efforts qui prennent naissance sont régulièrement répartis et les risques d'accident réduits à une proportion pratiquement négligeable.

Le résultat de ces quelques précautions fut une diminution tout à fait sensible des déchets, le Laboratoire avait fait la preuve de son utilité dès sa naissance, il allait donc pouvoir s'attaquer à des travaux plus importants mais dont l'intérêt pratique n'apparaîtrait qu'à longue échéance; toutefois en engageant le gros de ses forces dans cette nouvelle voie, il gardait une réserve pour l'étude de questions d'intérêt immédiat afin d'entretenir la confiance.

Étude générale des dilatations.

Le souci de mener très rapidement à bien nos premières études sur les efforts dans le verre nous a fait négliger jusqu'ici les régions immédiatement voisines des passages métalliques; nous allons voir que cette lacune ne peut être comblée que moyennant l'une des études générales annoncées ci-dessus.

L'étude des efforts dans les enrobages fut entreprise sur des séries de pieds traités en étuve à température exactement contrôlée et l'on trouva que les efforts observés étaient bien constants pour plusieurs séries successives, puis passaient à une nouvelle valeur pour plusieurs séries encore et ainsi de suite; on put établir très rapidement que chaque changement correspondait à une nouvelle livraison de

verre d'enrobage, les propriétés de ce verre étaient donc en cause et singulièrement sa dilatation.

Procédés anciens. — Le seul procédé de mesure des dilatations dont on disposât alors dit du « fil biverre » ne permettait que des comparaisons entre verres de compositions analogues, mais il était fidèle et extrêmement sensible (*fig.* 8); le bout d'une

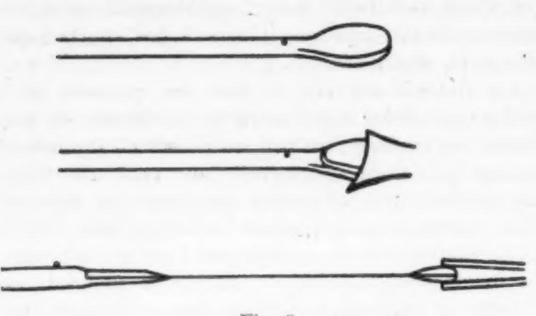


Fig. 8.

baguette du verre à étudier est ramolli à la flamme et aplati en forme de palette; on y dépose une petite masse d'un verre témoin qu'on aplatit de façon à avoir sur la palette une couche d'épaisseur à peu près égale, on force au besoin un peu la flamme pour que les deux verres soient bien plastiques et l'on étire brusquement la palette et sa charge qui sont alors bien soudées ensemble; on obtient ainsi un bilame très fin. Les longueurs des lames étant accordées à chaud, si les dilatations des composants ne sont pas identiques, il s'incurvera en refroidissant, le verre le plus dilatable étant à l'intérieur de la concavité. Le procédé n'est bien entendu valable que si les deux verres deviennent solides en même temps, il ne permet guère de chiffrer les écarts.

C'est pourtant grâce à lui qu'on pouvait déterminer en verrerie si la fusion en cours pourrait donner du verre spécial pour enrobage, c'est-à-dire de dilatation particulièrement bien définie, accordée sur celle du métal des passages; on conservait toujours pour cela un échantillon d'une fusion ayant donné satisfaction et avant de « travailler » le pot, on faisait un fil biverre avec ce témoin et une prise d'essai du pot; si le fil était nettement courbe, on disait que le verre était de qualité « ordinaire » et on le travaillait en ampoules ou en tubes, mais s'il était à peu près droit, on disait que le verre était de qualité « spéciale pour enrobage » et on le travaillait uniquement en baguettes.

Malgré sa grande sensibilité, sa séduisante simplicité et sa rapidité de mise en œuvre, le procédé du fil biverre ne pouvait servir de base à une étude scientifique sérieuse du fait que les comparaisons permises se limitaient à des verres de compositions analogues et qu'elles n'étaient pas quantitatives. Il n'en reste pas moins un auxiliaire précieux permettant de classer très rapidement les verres d'une même famille par rapport à des jalons mesurés au dilatomètre.

Mesures au dilatomètre et au polariscope. — L'appareil que nous avons utilisé, dérivé du modèle visuel décrit par Burger, permettait la comparaison de n'importe quels verres ou métaux mis sous forme de baguettes cylindriques de 300 mm de longueur et de 2 à 7 mm de diamètre, jusqu'à des températures de l'ordre de 550° avec une précision relative atteignant 2.10^{-8} sur le coefficient de dilatation. Plus de 1 000 verres et métaux furent essayés et les résultats obtenus peuvent être résumés comme suit : les verres utilisés en technique radio sont divisés par les utilisateurs en deux grandes classes : les « verres durs » qui se soudent les uns au molybdène, les autres au tungstène et les « verres tendres » qui se soudent les uns au ferrochrome, les autres au copperclad, passage composite avec âme de ferronickel commandant la dilatation et revêtement très mince de cuivre favorisant l'adhérence du verre.

Au point de vue dilatométrique ces verres possèdent des propriétés générales communes; les courbes de dilatation de plusieurs échantillons d'une même fusion ne sont pas en général identiques mais dépendent de l' « histoire thermique » de chacun; si l'échantillon est bien recuit, la courbe de dilatation (*fig.* 9) affecte la forme de deux éléments

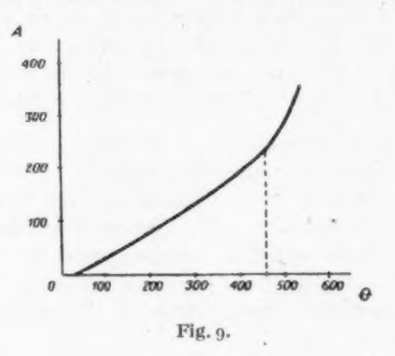


Fig. 9.

sensiblement linéaires raccordés par une zone à forte courbure, l'allongement commence donc par être proportionnel à la température puis on entre dans une « zone de transformation » parfois si étroite qu'on a pu la confondre avec un « point de transformation », suivie d'une région dans laquelle l'allongement est de nouveau proportionnel à la tempé-

rature mais suivant une loi plus rapide qui se poursuit sans accident jusqu'au ramollissement; si l'on a affaire à un échantillon énergiquement trempé (*fig.* 10), l'allongement commence encore par être

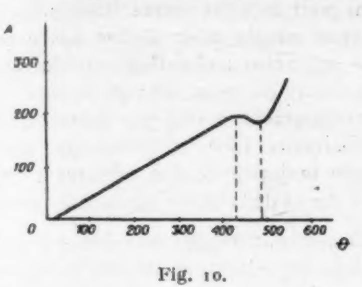


Fig. 10.

proportionnel à la température mais suivant une loi un peu plus rapide, puis il se met à croître moins vite (il peut dans certains cas aller jusqu'à s'inverser), il revient ensuite assez brusquement à une croissance proportionnelle à la température suivant une loi plus rapide que celle du départ, qui se prolonge sans accident jusqu'au ramollissement comme dans le cas du verre recuit.

Cette étude préliminaire montre que ces verres se comportent comme tous ceux qui ont déjà été étudiés (en particulier par M. Bernard Long dont le livre *La Fusion du verre* fait autorité) et que parler de leur dilatation sans préciser davantage n'a aucun sens.

On a vu que les soudures verre-métal étaient faites à la flamme puis recuites en étuve; la dilatation qui nous intéresse est donc celle d'un échantillon ayant subi ce dernier traitement; il suffit alors d'imposer au four du dilatomètre une loi de refroidissement analogue à celle des étuves et de relever la courbe de contraction pendant le refroidissement,

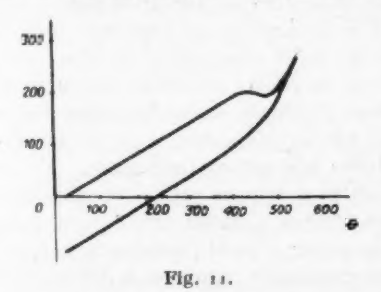


Fig. 11.

c'est la comparaison de cette courbe avec celle du métal étudié dans les mêmes conditions qui renseignera sur les possibilités de soudure entre eux.

Pratiquement donc, on introduit dans le dilatomètre un échantillon dont on relève (*fig.* 11) la courbe de dilatation jusqu'à la température qui assure un bon recuit dans les étuves d'atelier; cette courbe dépend de l'état initial de trempe de l'échantillon; puis on laisse redescendre la température suivant une loi calquée sur celle des étuves et l'on relève la courbe de contraction, courbe caractéristique du verre employé parce qu'indépendante de son état initial.

C'est une courbe de verre recuit composée de deux éléments sensiblement rectilignes raccordés par une zone de transformation étroite à forte courbure, on a décidé de caractériser la dilatation du verre par le coefficient angulaire de la branche de cette courbe s'étendant de la température ambiante à la zone de transformation.

Toutefois cette branche n'étant pas *exactement* rectiligne, on prendra le coefficient angulaire α de la droite joignant le point d'abscisse 25° à celui d'abscisse 325° comme caractéristique de la dilatation du verre. On mesurera également le coefficient angulaire α_m de la droite joignant le point d'abscisse 25° à celui d'abscisse θ_m définie comme suit : lorsqu'on rapporte (*fig.* 12) la dilatation du

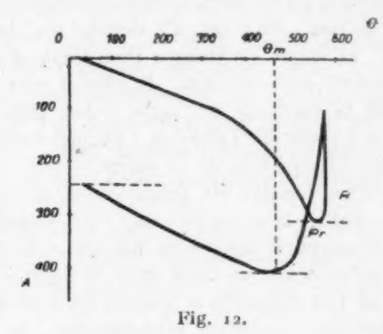


Fig. 12.

verre à celle du métal auquel il peut se souder, la courbe de contraction du verre recuit passe par un minimum à la température θ_m. Ce sont les coefficients α_m qui caractérisent avec le plus de sensibilité la qualité de l'accord de différents verres avec un même métal.

Les courbes « de départ » qui dépendent de l'histoire thermique de l'échantillon ne donnent pas en général de renseignements sur ses propriétés intrinsèques, elles possèdent toutefois une région R particulièrement intéressante, celle qui précède immédiatement la dernière branche quasi rectiligne qui aboutirait au ramollissement; cette région est à courbure d'autant plus forte et correspond à une température d'autant plus élevée que le verre est plus trempé. Or les échantillons que nous utilisons normalement provenant tous de l'étirage à l'air

de verre pris directement dans le pot de fusion, leur trempe est assez constante et très énergique, la région R est alors très courbée et étroite, particulièrement bien définie sur les courbes rapportées à un étalon en métal des passages où elle prend la forme d'un minimum aigu P_r. Nous avons observé très rapidement que P_r était toujours séparé du maximum de température (empiriquement défini par le recuit en étuve) par un intervalle de température à peu près constant de 20 à 30°.

Ce point devait donc avoir une signification physique précise; une étude polariscopique sommaire nous a montré qu'il constituait une limite de température au-dessus de laquelle les efforts internes se relâchaient extrêmement rapidement dans le verre : un morceau de verre trempé est mis dans un four tubulaire à travers lequel on peut viser et constamment observer au polariscope; si l'on chauffe le four on observe d'abord des variations de biréfringence, puis une disparition brusque de celle-ci et la température, compte tenu de l'hystérésis thermique dans le verre, est alors celle de la région R.

On a donné à P_r le nom de « point de relâchement des tensions » et on l'a adopté comme caractéristique auxiliaire de nos verres car, s'il dépend de l'histoire thermique, un degré de trempe bien facile à reproduire le définit suffisamment, de plus il permet de caractériser la fusibilité du verre à peu près aussi bien que le « point de Littleton » auquel des essais plus récents ont permis de le relier.

La fusibilité relative de deux verres se mesure empiriquement de la façon suivante : les échantillons qu'on veut comparer sont deux baguettes de même diamètre qu'on soude en bout dans la flamme, puis on laisse un peu refroidir et quand les verres sont encore plastiques on étire brusquement; le verre le moins fusible « emmène » la soudure de son côté. Les points de relâchement des tensions, tout comme les points de Littleton des verres, sont toujours rangés dans le même ordre que les fusibilités ainsi déterminées.

Normalisation des expériences. — L'étude dilatométrique d'un verre peut donc maintenant être dégagée de tout empirisme; en effet, d'une part la température maxima peut être rattachée au point de relâchement des tensions qu'on sait mesurer avec précision; d'autre part, la disparition des efforts internes dans la masse du verre est toujours assurée en étuve pour un refroidissement linéaire de 1°,5 par minute dans l'intervalle limité par la température maxima et s'étendant sur 150°, la vitesse de refroidissement devenant ensuite indifférente sous réserve de ne pas provoquer la rupture du verre par le développement de tensions temporaires par trop violentes. L'examen des courbes de contraction correspondantes apprend que la zone de transformation est toujours comprise dans l'intervalle de 150° ainsi défini pour tous les verres étudiés.

Nous avons adopté pour toutes nos expériences les normes suivantes : chauffage rapide jusqu'à 20 ou 30° au-dessus du point de relâchement des tensions, refroidissement à 1°,5 par minute jusqu'à ce qu'on ait parcouru 150°, et quelconque après.

La grande majorité de nos mesures a porté sur des verres « durs » de la classe soudant au molybdène.

Résultats généraux relatifs aux verres « durs ». — Le coefficient de dilatation de ces verres (α_m) est de l'ordre de 50.10^{-7}, le point de relâchement des tensions de l'ordre de 500°.

La différence entre les coefficients de dilatation de verres entrant dans la fabrication d'une même lampe ne doit jamais excéder 2 %; pour les points de relâchement des tensions l'écart maximum tolérable est de 10°. Ces tolérances sont faciles à tenir en verrerie à condition de peser soigneusement les compositions, dès 1937 les verreries de Bagneaux étaient en mesure d'y faire face couramment.

Du même coup la distinction entre verres de qualité « ordinaire » et « spéciale enrobage » disparaît et en même temps toutes les fuites entre verre d'enrobage et verre du pied dues à un trop grand écart des points de relâchement des tensions.

Quant à la valeur même du coefficient de dilatation, il était depuis longtemps d'usage d'avoir deux nuances, l'une pour les lampes petites et moyennes, l'autre légèrement moins dilatable pour les lampes à grande puissance comportant des anodes externes en cuivre. Cette différence ne provenait pas de la nécessité d'une soudure au cuivre puisqu'on éliminait l'influence de la très grande dilatation de ce métal en faisant le joint sur le bord extrême d'un cylindre assez aminci pour être souple et absorber par sa déformation les efforts considérables inévitablement mis en jeu; d'ailleurs si l'on inversait les nuances ce sont les fêlures aux passages qui rendaient effectivement toute fabrication impossible.

Les pieds pour lampes petites et moyennes étant à peu près libres d'efforts, ceux pour lampes de grande puissance étaient nettement comprimés et si l'on essayait de les faire avec le verre destiné aux petites lampes, on avait bien des pieds libres d'efforts mais ils ne résistaient pas à l'usage.

Cela s'explique parfaitement si l'on considère que les lampes de grande puissance travaillent à des températures relativement très élevées où le verre est plus fragile, et il importe qu'il soit alors libre

de tensions. Or la courbe d'un verre recuit rapportée au métal du passage est en dessous de l'axe sur un long intervalle de température, si donc la soudure est libre d'efforts à froid, le métal, qui tend à s'allonger plus que le verre, met celui-ci en tension à mesure que la température s'élève, l'effort croissant jusqu'à θ_m puis décroissant pour s'annuler à la température où la courbe recoupe l'axe, après quoi l'on passe en compression croissante jusqu'au relâchement.

L'étude polariscopique directe a pleinement confirmé ces prévisions, le maximum de tension est fort net pour O_m; température qui coïncide malheureusement à peu près avec celle de fonctionnement des grosses lampes, et pour obtenir l'absence d'efforts à cette température il faut partir d'une compression initiale judicieusement réglée.

La température de fonctionnement des lampes petites et moyennes étant nettement plus basse, et le diamètre des passages beaucoup plus petit, la tension alors développée dans un passage libre d'efforts à froid est assez faible pour n'être guère dangereuse; on pourrait évidemment la compenser par une compression initiale, mais cela représenterait une complication hors de proportion avec le risque couru. En effet, s'il est très facile de reconnaître d'un regard rapide au polariscope d'atelier si un pied est exempt d'efforts ou à peu près, un examen soigneux par un œil exercé est indispensable pour évaluer à l'aide du même appareil si une compression notable est assez voisine d'une valeur fixée; seules des pièces importantes produites en relativement petites quantités et pour lesquelles le risque est sérieux justifient les frais correspondants.

L'usage d'utiliser un verre spécial, à dilatation légèrement diminuée, pour les grosses lampes est donc parfaitement légitime en tant qu'artifice commode pour obtenir automatiquement des passages où le verre est comprimé à froid.

Étude de l'accrochage du verre sur le métal. — Les études polariscopiques à chaud ont de plus attiré notre attention sur le phénomène suivant : le passage verre-métal initialement libre d'efforts à froid que nous avons utilisé pour suivre le développement des contraintes dans le verre avec la température a été chauffé au-dessus du point de relâchement des tensions, or il ne redevient libre d'efforts à la température ordinaire que s'il a été refroidi à une vitesse donnée sur une bande étroite de température comprenant le point de relâchement des tensions; les vitesses plus faibles conduisent à des compressions, les plus grandes à des tensions.

Nous avons d'abord pensé que c'était un simple effet de la variation de la dilatation du verre avec la vitesse de refroidissement, mais des essais au dilatomètre avec des vitesses donnant respectivement un passage nettement tendu et un passage nettement comprimé ont conduit à des courbes de contraction à très peu près superposables, les faibles écarts observés étant dans le bon sens, mais pratiquement négligeables.

C'est l'observation attentive de l'apparition des efforts au début du refroidissement qui a livré la clé du problème; en effet, ceux-ci apparaissent toujours à des températures voisines du point de relâchement des tensions tel qu'on l'a défini ci-dessus, mais d'autant plus basses que le refroidissement est plus lent; ces températures, que nous avons appelées « d'accrochage » du verre sur le métal, sont donc celles auxquelles le verre est assez rigide pour ne plus glisser sur le métal pour un gradient défini, et plus le gradient est faible, plus la température d'accrochage correspondante est basse. Pour obtenir rapidement des températures d'accrochage de plus en plus basses, la meilleure méthode pratique est d'opérer une descente rapide de température et de faire un palier dès que les offerts apparaissent; ils disparaissent bientôt par viscosité; on baisse alors un peu la température pour faire un nouveau palier, et ainsi de suite; on peut par ce moyen gagner très rapidement plusieurs degrés, ce qui suffit amplement dans la plupart des cas.

Pour se rendre compte aisément de la signification physique de point d'accrochage, il suffit de reporter sur un même graphique (*fig.* 13) les courbes de

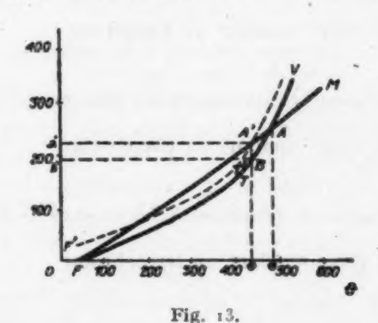


Fig. 13.

contraction MAF du métal et VATF du verre; la soudure sera libre d'efforts à froid si le point d'accrochage coïncide avec le point d'intersection A des deux courbes; si l'accrochage n'a lieu qu'en A', le verre n'est réellement solide qu'à partir de ce point, et s'il était libre il se contracterait suivant la

courbe A′T′F′ déduite de ATF par la translation BA′; sa contraction serait donc inférieure à celle du métal de FF′ = BA′, il est donc comprimé par celui-ci. On verrait de même que si l'accrochage avait lieu au-dessus de A on aboutirait à une tension à froid.

Sans entrer dans des détails qui sortiraient du cadre de cet exposé, notons encore qu'on peut jouer sur l'accrochage en donnant dans la région critique des températures différentes au verre et au métal, ce qui est facile en raison de leurs différences de conductibilité.

Conclusions générales. — Toutes les recherches que nous venons de décrire ont été conduites à partir de verres soudant au molybdène des deux nuances de dilatation, mais on les a toujours vérifiées tant sur les verres soudant au tungstène que sur les verres « tendres » et les passages qui leur conviennent.

Le résultat pratique a été la fixation de tolérances sur la dilatation et sur le point de relâchement des tensions pour chaque type de verre. C'est ainsi que si l'on admet $58,2.10^{-7}$ comme coefficient de dilatation moyen du molybdène entre 25 et 525° (mesure rapportée à la silice fondue opaque prise pour étalon de base), les verres destinés à la fabrication de lampes moyennes et petites avec passages de molybdène devront satisfaire aux conditions suivantes :

$$51,5.10^{-7} < \alpha_m < 52,5.10^{-7},$$
$$505 < \text{point de relâchement des tensions} < 515.$$

Pour le verre destiné aux lampes de grande puissance :

$$49,5.10^{-7} < \alpha_m < 50,5.10^{-7},$$
$$490 < \text{point de relâchement des tensions} < 505.$$

Pour le verre soudant au tungstène :

$$39.10^{-7} < \alpha_m < 40.10^{-7},$$
$$540 < \text{point de relâchement des tensions} < 550.$$

Pour le verre soudant au copper-clad :

$$85.10^{-7} < \alpha_m < 100.10^{-7},$$
$$450 < \text{point de relâchement des tensions} < 500.$$

Pour le verre soudant au ferrochrome :

$$95.10^{-7} < \alpha_m < 105.10^{-7},$$
$$450 < \text{point de relâchement des tensions} < 500.$$

L'application stricte du Cahier des Charges ainsi défini a effectivement éliminé les accidents correspondants. Mais cela n'a été possible que lorsque des verres faciles à fabriquer avec la précision suffisante eurent été mis au point, comme on le verra dans un chapitre suivant.

Bien entendu, l'analyse dilatométrique a encor été d'un grand secours dans l'étude des alliage spéciaux à base de fer nickel et cobalt, ou de fer e nickel tels que kovar, platinites, etc., qui ont fai l'objet des études spéciales relatées ci-dessous.

Étude de l'adhérence du verre au métal.

Pour qu'une soudure verre-métal soit étanche il ne suffit pas que les dilatations soient convena blement accordées, il faut encore qu'il existe un couche de passage constituée par la dissolutio d'un oxyde dans le verre.

On a souvent cité et même breveté des scellement constitués par un verre et un métal non attaqu par lui, mais la confection de tels joints impliqu des précautions peu compatibles avec les nécessité d'une fabrication et leur étanchéité reste aléatoir si toute trace d'oxydation est réellement absente

Si le métal est au contraire suroxydé, le ver se concentre assez en oxyde pour que sa dilatatio soit modifiée, d'où apparition d'efforts au refroi dissement et risque de fêlure.

Tests colorés. — Le « degré d'oxydation » à rechercher est donc assez critique et un critère es indispensable; l'usage s'est établi de recourir à l couleur que communique au verre la dissolutio de l'oxyde et qui dépend en effet de sa nature et d sa concentration.

Nos essais ont porté sur le molybdène, le tungstène le cuivre, les alliages fer-nickel-cobalt et fer-nick ainsi que sur les ferrochromes.

Seuls le molybdène et le cuivre (anodes et copper clad) étaient couramment utilisés au début, et un soudure était réputée bonne quand la partie d métal enrobée dans le verre apparaissait à traver celui-ci d'un marron rutilant pour le molybdèn et d'un rouge cerise pour le cuivre.

En réalisant systématiquement des séries d soudures dans lesquelles le molybdène se trouvai à des degrés croissants d'oxydation, on a pu s convaincre de l'excellence de ces tests empiriques car des joints insuffisamment oxydés dans lesquel le métal apparaît avec son éclat naturel ou ave les reflets « acier » des sous-oxydes offrent de grande chances de fuites alors que les joints suroxydé sont reconnaissables à leur aspect foncé ou noirâtr et se comportent comme si l'accord de dilatatio était rompu.

Lorsque nous avons entrepris l'étude des alliage fer-nickel-cobalt, fer-nickel et fer-chrome, nou n'avons pu mieux faire que d'instituer des test colorés calqués sur les précédents; ils sont d'ailleur

valables pour tous ces métaux et le seront encore sans doute pour ceux à venir restant dans la classe des aciers dits inoxydables : la bonne teinte est d'un « gris souris » plus ou moins foncé, l'éclat métallique ou le bleu acier dénotant une oxydation insuffisante et des risques de fuite, les tons noirâtres une suroxydation et des risques de fêlure, le gris souris est remplacé par un gris jaunâtre avec certains verres; c'est encore une bonne teinte encadrée par les mêmes extrêmes à éviter.

En ce qui concerne le tungstène, le test est le même que pour le molybdène, à la seule différence que la « bonne teinte » est d'un brun plus foncé et plus terne.

Enfin pour le cuivre, la présence d'un peu de fer dans le verre favorise l'adhérence; d'autre part, il arrive que des verres pauvres en acide borique lui communiquent une teinte tirant sur le doré au lieu du rouge cerise habituel, et les passages correspondants paraissent étanches, mais nous n'avons fait qu'un petit nombre d'expériences à ce sujet.

Phénomènes d'électrolyse. — Un accident d'apparence déconcertante fit son apparition dès que les fabrications s'orientèrent vers les lampes de plus en plus poussées; la lampe présentait toutes les garanties après sa fermeture : efforts négligeables dans les pieds, couleur satisfaisante de tous les passages, bonne étanchéité sur pompe, mais soit en cours de pompage, soit après finition totale, au bout de quelques heures de fonctionnement, certains passages se mettaient à changer de couleur et ne tardaient pas à fuir ou à fêler.

Les passages incriminés étaient de deux sortes : les uns virant du côté des couleurs correspondant à la suroxydation finissaient par fêler, les autres virant au pâle puis à des couleurs irisées se mettaient à fuir et fêlaient par surcroît; on put vite repérer que pendant le fonctionnement de la lampe, les premiers constituaient les anodes, les seconds les cathodes d'un circuit électrique à courant continu, il y avait donc une électrolyse du verre.

Cet accident fut le premier à attirer l'attention sur les propriétés électriques des verres, il fallait bien admettre que tous n'étaient pas des isolants idéaux en toutes conditions, et une étude spéciale s'imposait si l'on ne voulait pas voir le progrès freiné par là.

En attendant, le seul palliatif possible était de diminuer la température, car la sensibilité à l'électrolyse est fonction de la viscosité; les accidents au pompage ont été effectivement réduits par des refroidissements locaux, mais on ne pouvait espérer trouver mieux que des expédients de ce genre tant que des verres spécialement étudiés ne pouvaient être produits.

Attaque chimique des joints. — Enfin un dernier problème restait posé dans le domaine de l'adhérence verre-métal par un défaut toujours accompagné d'une modification de couleur des enrobages, à savoir l'éclatement spontané du verre autour des passages dans des lampes n'ayant pas fonctionné depuis longtemps.

Ce défaut ne se manifestait jamais en usine ni sur les lampes en fonctionnement permanent; il était au contraire fréquent après un long stockage, particulièrement aux Colonies ou au bord de la mer.

L'aspect du passage accidenté suggérait irrésistiblement un gonflement du métal ayant forcé le verre jusqu'à rupture, ce qui ne pouvait s'expliquer par un échauffement anormalement brutal du passage, puisque cela arrivait à des lampes au repos souvent neuves.

En créant artificiellement un climat maritime colonial dans une étuve, on obtint la synthèse du défaut en moins d'un mois; il provenait de l'attaque foisonnante du métal par l'humidité, attaque cheminant sous le verre et provoquant sa rupture. Le remède fut donné par l'utilisation de passages inattaquables ou par un revêtement protecteur convenable.

La dernière solution étant la plus immédiate, le laboratoire a mis très rapidement au point un procédé électrolytique permettant de traiter les pieds et même les lampes terminées et assurer par ses propres moyens pendant de longs mois la protection d'un grand nombre de lampes.

Mise au point de procédés modernes.

Un des premiers soucis de M. de Freminville avait été de mettre au point des verres répondant aux exigences que les études générales avaient montrées nécessaires, et dès la fin de 1936 il pouvait faire produire par les Verreries de Bagneaux les deux verres soudant au molybdène nécessaires à la production courante dits 119 et L qui représentaient un progrès certain sur tous ceux utilisés à l'époque. Du côté des verres dits tendres, beaucoup moins employés, la production courante des usines fournissant normalement le verre pour lampes de réception suffisait à tous les besoins.

Nous avions étudié d'autre part les alliages à point de transformation dont la courbe de dilatation est très voisine de celle d'un verre recuit, alliages fer-chrome et fer-nickel pour les verres

tendres, fer-nickel-cobalt pour les verres durs du type soudant au molybdène; ces alliages permettent des soudures extrêmement résistantes et faciles à obtenir avec des verres convenables, et le verre L s'accordait remarquablement avec le fer-nickel-cobalt américain, dit kovar, qu'on pouvait alors se procurer facilement.

Nos études générales étant assez avancées et les besoins immédiats satisfaits, le temps était venu de songer à développer de nouvelles techniques dégagées d'empirisme et permettant des productions régulières en grande série et à bon marché.

La première étude de réalisation a été celle d'un pied à deux conducteurs fait à la machine par procédé électrique : on part d'une coupelle de verre percée de deux trous et de passages en kovar enfilés dans ces trous et arrêtés par un épaulement, les passages sont chauffés au rouge électriquement, le verre fond autour d'eux et les enrobe, puis le courant est coupé, et il n'y a plus qu'à recuire le pied ainsi formé.

La forme du pied est exactement déterminée par la coupelle obtenue à la presse en verrerie; l'état d'oxydation des passages est défini par le régime de chauffage dont on est maître, la position des passages, enfin, maintenus par une pince massive, est aussi déterminée avec précision.

Ce procédé, qui a permis en son temps une production régulière, n'offre plus qu'un intérêt rétrospectif, mais il tient en germe une nouvelle orientation de la technique verrière appuyée sur les résultats d'études générales.

On trouvera dans les deuxième et troisième parties le détail des résultats acquis récemment suivant ces idées directrices; chacune est rédigée par l'ingénieur responsable du groupe de recherches correspondant; quelques mots sur l'orientation actuelle des travaux et les programmes d'avenir serviront auparavant de conclusion à cette présentation.

Vue générale des recherches en cours.

Les chapitres précédents ont assez montré l'importance des mesures de dilatation pour laisser prévoir que les recherches correspondantes doivent être poursuivies et amplifiées.

Pour cela, le besoin d'un instrument plus moderne se faisant sentir, nous avons entrepris la construction d'un nouvel appareil dérivant de celui popularisé par M. Chevenard. C'est encore un appareil différentiel, mais il est enregistreur; sa précision est de 2.10^{-8} sur le coefficient de dilatation, mais les échantillons sont réduits à 100 mm de long; d'autre part, il peut monter à 1 000° et travailler sous vide.

L'appareil étant enregistreur, le personnel chargé de relever les courbes par points se trouve libéré, de plus le rendement est automatiquement doublé car il peut fonctionner la nuit; la diminution de longueur des échantillons permet plus de rigueur dans l'uniformité de température d'un bout à l'autre; les verres les plus « durs » pourront être étudiés et le choix des étalons de référence n'est plus limité par les risques d'erreur qu'entraîne l'attaque chimique par l'atmosphère du four. Enfin, l'appareil étant différentiel, on pourra toujours obtenir directement la courbe de dilatation d'un verre rapportée au corps qu'on se propose de lui sceller.

De son côté, le polariscope permettant de suivre l'évolution avec la température des efforts développés dans le verre d'un joint, a été remplacé par un polarimètre permettant l'étude quantitative; on perfectionne maintenant le four lui-même en le munissant d'un système de pinces facilitant la manipulation des échantillons pendant les expériences et d'opercules transparents non biréfringents pour assurer une meilleure définition de la température; la précision de la mesure des températures est aussi en voie d'amélioration par une meilleure disposition du couple par rapport à l'échantillon.

A côté des travaux concernant la dilatation, on cherche à interpréter physiquement les conditions d'adhérence du verre à un corps non vitreux qu'on veut lui souder, et l'étude des couches de passage par diffraction électronique commence à donner des résultats extrêmement encourageants. Nous espérons obtenir prochainement des renseignements d'un autre ordre par l'examen des mêmes échantillons au microscope électronique; toutefois nous attendons encore plus de ce nouvel auxiliaire dans l'étude superficielle du verre lui-même, en particulier les recherches sur le développement des fêlures à partir de rayures submicroscopiques, déjà commencées à l'ultramicroscope visuel, pourront être reprises et précisées.

On travaille aussi en permanence sur les propriétés électriques des verres, la résistance à l'électrolyse étant caractérisée par les courbes de résistivité en fonction de la température ou en fonction du temps pour des températures fixes; les phénomènes de polarisation qui prennent naissance dès que le caractère électrolytique du verre devient sensible sont également étudiés, ainsi que les modifications chimiques subies par les électrodes dès que les ions apparaissent à leur surface.

Les pertes dans le verre considéré comme un

diélectrique, en fonction de la fréquence du courant employé et de la température sont également relevées, ainsi que son pouvoir inducteur spécifique.

De même ses propriétés mécaniques et ses propriétés chimiques dont l'étude doit être poussée jusqu'à la mise au point d'une méthode pratique d'analyse.

Toutes les études que nous venons de passer en revue sont orientées *a priori* vers des possibilités d'améliorations pratiques rapides; cependant des recherches d'ordre beaucoup plus général sur l'état vitreux sont menées parallèlement mais non indépendamment; en effet, ces travaux d'ordre plus élevé peuvent bien paraître désintéressés à première vue, mais un examen tant soit peu attentif fait éclater leur caractère pratique.

Le verre ne se comporte ni comme un corps à structure cristalline, ni comme un liquide, ni comme un corps à structure colloïdale, tout en présentant successivement des analogies avec ces trois groupes quand on fait le tour de ses propriétés; d'autre part, des analogies frappantes entre tous les verres suggèrent irrésistiblement la notion d'état vitreux, caractéristique d'une structure à part mais encore mal connue.

Il n'est donc pas téméraire de penser que la théorie qui reliera entre elles les propriétés disparates de ce protée ne pourra manquer d'éclairer le champ de ses applications connues et nous en suggérer de nouvelles.

Les belles recherches que M[me] Winter-Klein a menées à bien dans la voie ouverte par Lebedeff ont amené à modifier les conceptions classiques sur la trempe et le recuit des verres d'optique en introduisant la notion de deux états physico-chimiques α et β stables respectivement à froid et à chaud indépendamment de tous efforts mécaniques internes. Ces travaux ont été conduits en prenant presque toujours l'indice de réfraction pour paramètre, et très accessoirement coefficient de dilatation; l'étude de nos verres à ce point de vue est actuellement en cours, mais nous nous proposons de prendre au contraire pour paramètre principal la dilatation, n'utilisant les mesures d'indice qu'à titre de vérification, et pour relier nos résultats à ceux de nos prédécesseurs.

Un dilatomètre spécial permettant l'emploi d'échantillons aussi petits que possible est donc ici indispensable; nous achevons dans ce but la construction d'un appareil interférentiel utilisant pour échantillon un seul bâtonnet de 10 mm de longueur sur 0,5 à 1,5 mm de diamètre et donnant directement les allongements sans passer par l'intermédiaire d'un témoin supposé connu; à part cela ses caractéristiques seront les mêmes que celles du dilatomètre différentiel décrit ci-dessus qu'il pourra servir encore à étalonner.

Un four à tremper permettant de traiter aussi bien les échantillons destinés aux mesures d'indice que les bâtonnets du dilatomètre interférentiel est également à l'étude.

Une autre source importante de renseignements sur l'état vitreux est l'étude des verres par les rayons X; l'utilisation de cette technique a amené Randall puis Warren et enfin Zachariasen à des théories différentes, entre lesquelles Valenkov et Poray-Koschitz ont essayé de décider pour conclure finalement en faveur de Randall. Tous ces auteurs ont été gênés par les durées de pose très élevées nécessaires à l'obtention de diagrammes utilisables, il semble qu'en éliminant le fond continu par l'emploi d'un rayonnement strictement monochromatique, on puisse augmenter le contraste dans des proportions telles que le temps de pose soit ramené à des valeurs courantes en radiocristallographie; nous utilisons pour cela le monochromateur à cristal courbé de Johanssen adapté par M. Guinier au rayonnement X et qui a déjà permis à cet auteur d'obtenir des diagrammes de silice vitreuse en 30 min.

Prolongeant naturellement cette méthode, la diffraction électronique qui nous a déjà donné d'excellents résultats sur les couches de passage, est systématiquement appliquée à l'étude des verres, soit par réflexion directe sur leur surface naturelle, soit après les avoir réduits en poudre, par utilisation de la méthode générale décrite dans le n° III des *Annales* par M. Devaux. Nous avons maintenant abandonné le procédé par transmission, tel que l'a utilisé Shishakow dont nous n'avons d'ailleurs pas retrouvé les résultats, plus difficile et long à mettre en œuvre.

Enfin, des comparaisons entre les spectres d'absorption d'un liquide et d'un verre tenant en solution le même colorant ont permis au Dr Weyl de donner des interprétations séduisantes de phénomènes liés à l'état vitreux et en particulier de l' « anomalie borique » caractéristique de l'importante classe des borosilicates; nous nous proposons d'appliquer ce procédé d'investigation, mais il rend indispensable la présence au laboratoire d'un four spécialement adapté à la fusion du verre. Les autres recherches qui s'accommodaient tant bien que mal de la nécessité de recourir à une verrerie à chaque fois qu'un essai s'avérait nécessaire, bénéficieraient aussi grandement de la commodité d'avoir sur place un four permettant la réalisation de fontes d'essai de quelques centaines de grammes.

La construction d'un tel four est dès maintenant entreprise, les creusets seront fournis par notre Laboratoire de Céramiques, et, capable de plusieurs fontes par jour, il permettra la vérification sans retard des résultats de toutes les recherches du programme.

DEUXIÈME PARTIE.

ÉTUDE GÉNÉRALE DE LA MISE AU POINT DE VERRES SPÉCIAUX MODERNES ET DES PROCÉDÉS PERMETTANT LEUR UTILISATION RATIONNELLE.

Le travail du verre est connu depuis une très lointaine antiquité puisque certains attribuent son invention aux Phéniciens. Il semble que, dès l'origine, l'homme ait cherché à exploiter certaines propriétés exceptionnelles des verres minéraux comme leur grande transparence à la lumière, leur insolubilité, leur étanchéité aux liquides, leur plasticité à chaud, propriétés que l'on ne retrouvait dans aucune autre espèce de corps.

Pendant longtemps les procédés de travail et les compositions chimiques consacrés par l'usage furent conservés sans que l'on ait cherché à apporter d'autres modifications que des améliorations de détail. Il ne faut pas négliger cependant les efforts remarquables, qui, à la fin du Moyen-Age, portèrent l'art verrier à un haut point de perfection particulièrement en Italie.

Mais la verrerie resta jusqu'à une époque toute récente l'industrie fermée par excellence, royaume du secret, de l'empirisme, du tour de main héréditaire. L'explication d'un tel état d'esprit ne réside probablement pas seulement dans la crainte des maîtres verriers de voir la divulgation faciliter la concurrence, mais aussi dans la difficulté d'adapter la méthode scientifique à un art très complexe où la qualité de la main-d'œuvre et les recettes de fabrication encore difficilement explicables aujourd'hui tiennent la plus grande part.

Les progrès acquis en métallurgie pour la production des hautes températures que le verrier eut intérêt à transporter sur ses fours de fusion, les problèmes nouveaux posés par des industries neuves, comme l'éclairage et la radioélectricité, les exigences de la chimie, de la médecine, l'apparition de l'industrie du verre dans des pays sans passé industriel, qui n'avaient par suite rien à cacher, le perfectionnement des connaissances en chimie minérale, toutes ces circonstances concordantes se sont jointes pour éliminer les conceptions moyennageuses, imposer l'esprit scientifique, et donner à la verrerie une impulsion moderne.

Aujourd'hui, en pleine évolution, nous assistons à une véritable course au progrès, qui se traduit par un fourmillement de compositions chimiques et de procédés de travail nouveaux, de machines automatiques à grand débit et par l'apparition du verre dans les industries de la construction, des isolants thermiques, du textile, etc.

C'est un des aspects de cette évolution que nous nous proposons d'étudier dans cet exposé, en traçant un rapide tableau des résultats obtenus au Laboratoire de Recherches physico-chimiques de la C. S. F. dans le domaine de la verrerie pour tubes à vide pendant la période 1940-1945.

Comme les recherches de ce laboratoire avaient surtout en vue la construction de lampes d'émission, les problèmes ont été abordés davantage sous l'angle de la qualité que sous celui de la quantité, les efforts ayant pour objet de donner avant tout satisfaction aux utilisateurs du verre, c'est-à-dire au lampiste, en facilitant la construction et en permettant certaines hardiesses d'organisation du montage et au client, en assurant la vie de la lampe.

La nécessité de résoudre économiquement des problèmes de petites ou moyennes séries nous a orientés tout naturellement vers des solutions qui ne mettent en œuvre que des moyens mécaniques ou électriques peu compliqués, doués d'une grande souplesse d'exploitation.

Plan de l'exposé.

Après avoir examiné les procédés de travail du verre couramment utilisés dans l'industrie sous leur forme élémentaire, c'est-à-dire en les dégageant des détails d'appareillage et sans parler de leur mise en œuvre sur machines automatiques, nous essaierons dans la suite de cet exposé de définir les principaux problèmes que pose l'emploi du verre comme enveloppe, comme support et comme isolant dans la construction des tubes à vide.

Nous nous arrêterons quelque temps sur la soudure verre-métal et les principaux métaux soudant au verre.

Puis nous examinerons les qualités d'un bon verre radioélectrique et nous donnerons les principaux résultats d'une étude entreprise avec la collaboration des Cristalleries de Baccarat pour la mise au point de verres spéciaux.

Revenant sur des problèmes de construction, nous reprendrons l'étude de la fabrication des pieds de lampe, des ampoules et de la fermeture des

tubes à vide pour indiquer les solutions dont nous disposons aujourd'hui.

Aperçus sur le travail du verre.

Le verre fondu dans un creuset (pot ou bassin) est d'abord façonné à chaud plus ou moins grossièrement, puis recuit. Il subit ensuite le plus souvent un travail à froid qui peut se limiter au détachage de certaines parties inutiles, mais peut constituer également un travail de taille qui représente un nouveau façonnage. Les pièces peuvent être reprises au chalumeau de souffleur ou être décorées par des émaux à chaud ou de la gravure par voie chimique. Certaines propriétés mécaniques peuvent être développées par la trempe.

En laissant de côté la fabrication du verre en plaques, on peut distinguer arbitrairement trois modes de travail principaux du verre à chaud : le travail à la canne, à la presse et au chalumeau.

a. Travail en verrerie. — Le travail à la canne est probablement le plus ancien en date. Le verrier « cueille » le verre dans le pot en profitant de la viscosité favorable de la pâte à chaud, puis il pratique un façonnage plastique, soit en s'aidant des seules forces mécaniques (pesanteur, force centrifuge), soit en soufflant par l'âme de la canne, soit en utilisant des outils spéciaux; en général il opère par une combinaison de ces moyens. C'est ainsi que sont fabriqués en l'absence de machines à étirer les tubes et baguettes qui servent de matières premières aux souffleurs de verre.

Une variante vient de l'emploi du moule. Le verrier, après une certaine préparation, introduit le verre chaud dans un moule dont la forme reproduit en creux la forme extérieure de la pièce à obtenir, puis il souffle à la bouche par l'extrémité libre de la canne. La pression ainsi développée est faible, elle s'établit lentement. Pour bien remplir son moule et obtenir une bonne reproduction du relief, le verrier doit communiquer à la canne un mouvement de rotation autour de son axe. En l'absence de ce mouvement, les parties du verre qui touchent les premières le moule se trouvent brusquement refroidies, donc plus visqueuses; il en résulte des inégalités d'épaisseur et des déformations. Pour permettre le mouvement de rotation et pour faire isolant thermique, le moule est enduit de poussières (charbon de bois, graphite, etc.) convenablement déposées, quelquefois remplacées par de la vapeur d'eau. Ce procédé est connu sous le nom de « soufflé-tourné ». Il conduit à des pièces de bon aspect, mais qui doivent être obligatoirement des volumes de révolution autour d'un axe, l'axe de la canne. D'autre part la présence de poussières dont l'épaisseur est mal définie et varie au cours du service du moule introduit une erreur systématique sur les dimensions qui est de l'ordre des tolérances que l'on exige de certaines pièces précises. C'est par ce procédé que sont fabriqués par exemple la plupart des articles de gobeletterie, certains flacons et les ampoules utilisées habituellement par les constructeurs de lampes.

Un perfectionnement déjà ancien à ce procédé de moulage a été apporté par l'utilisation de l'air comprimé comme élément moteur de pression. La force développée étant beaucoup plus grande et plus subite, il est possible d'abandonner la rotation de la pièce et de souffler au contact direct du métal. Il n'est plus nécessaire de se limiter aux surfaces de révolution comme relief intérieur du moule dont la reproduction peut être très précise et fidèle. Un seul inconvénient : le moule doit être chauffé pour éviter que le contact ne glace la pâte et ne lui fasse brusquement perdre sa plasticité. Un avantage non négligeable est la réduction de fatigue du verrier.

Ce procédé dit « moulage pistonné » est très développé en flaconnage. En utilisant pour le moule, un métal finement poli, on peut communiquer ce poli au verre et obtenir une « peau » dont la qualité concurrence le poli par abrasif ou par voie chimique. Si le moule est fait de plusieurs morceaux, la pièce de verre porte des coutures qui reproduisent les assemblages et sont une marque caractéristique de ce mode de fabrication.

Tous ces procédés sont surtout adaptés à la fabrication des corps creux. Le moulage à la presse procède de conceptions plus simplistes et convient parfaitement à la fabrication de pièces massives. Il consiste à emprisonner le verre chaud dans un moule métallique en deux parties que l'on vient serrer après remplissage à l'aide de leviers manœuvrés à la main, commandés par came ou par air comprimé. Les efforts imposés au verre sont considérablement plus importants que ceux développés dans tous les procédés précédents; leur effet, associé aux variations de températures brutales et inégalement réparties qu'engendre le contact verre-métal, est responsable de certaines hétérogénéités des propriétés de la masse et de la surface qui nuisent à la solidité, et il est connu que le verre moulé est plus fragile que le verre soufflé. Sans être attaché à la contrainte d'une forme géométrique simple, on est cependant limité par la nécessité d'assurer le démoulage des mâchoires du moule, ce qui interdit la fabrication

de corps creux ou de reliefs très contournés. Par contre, ce mode de travail est rapide, il conduit dans certains cas à des produits finis sans retouche; il est très utilisé pour la fabrication d'une foule d'objets d'emploi domestique ou industriel.

b. Travail au chalumeau. — Jusqu'à présent nous n'avons vu que des procédés de travail exploités en verrerie, c'est-à-dire à côté du four de fusion, la matière première étant la pâte vitreuse semi-liquide. Avec le soufflage au chalumeau, familier aux lampistes et aux chercheurs de laboratoire, nous gravissons dès le départ un degré de l'échelle du prix de revient, puisque le souffleur utilise des pièces déjà manufacturées sous forme de tubes, baguettes, ballons, etc. Il n'est pas besoin de décrire en détail les opérations de caractère spécifiquement artisanal auxquelles se livre le souffleur de verre, pour tirer d'un tube une pièce compliquée, pourvue de « tubulures », de doubles soudures et autres appendices placés à la demande de l'utilisateur qu'en la matière aucune complication n'effraie. Mais cela ne va pas sans inconvénients : lenteur d'exécution, imprécision des cotes, impossibilité d'utilisation de verres très dévitrifiables ou sensibles à l'action chimique des flammes, main-d'œuvre très spécialisée.

Les résultats obtenus sont souvent remarquables mais bornés, et l'on voit mal quel progrès efficace on pourra apporter à cet art dont l'évolution semble terminée.

L'avantage majeur du procédé réside dans sa grande souplesse d'utilisation, variable d'ailleurs pour une grande part avec la qualité et l'esprit d'invention de l'ouvrier.

Naturellement une rédaction comme celle-ci ne peut être que très schématique; en fait tous les procédés précédents peuvent s'interpénétrer et se combiner pour conduire au mieux à la fabrication d'une pièce donnée.

Quelles sont les propriétés des verres que fait intervenir leur travail à chaud ? Elles sont multiples, et il serait inutile de les passer toutes en revue. Les principales sont : l'homogénéité de la pâte, sa plasticité, surtout fonction de la viscosité aux températures de façonnage, enfin la résistance du verre à la dévitrification, autrement dit sa stabilité physico-chimique. La part de ces facteurs se comprend d'elle-même et nous aurons l'occasion de les étudier plus en détail ultérieurement.

c. Travail à froid. — Le travail à froid du verre n'est pas moins important que le façonnage plastique, contrairement aux idées généralement répandues. Il serait fastidieux d'entrer dans le détail des opérations de taille et de polissage. Il suffit de savoir qu'à l'aide d'outils abrasifs ou supports d'abrasifs, le verre se coupe, se scie, se tranche, se taille, se meule et finalement se polit pour retrouver son aspect habituel transparent et miroitant. Il est possible de rendre ces opérations automatiques et d'obtenir des machines un travail précis quant aux côtés géométriques et d'exécution rapide, peu coûteuse en main-d'œuvre.

Les qualités à exiger du verre sont restreintes : il suffit que la pâte soit homogène et bien recuite. D'autres propriétés interviennent, comme la dureté, mais assez peu pour qu'on puisse les négliger au moins dans le domaine qui nous intéresse; on arrive en effet presque toujours à compenser les difficultés suscitées par les propriétés mécaniques des verres travaillés en modifiant les abrasifs. Fait très important : ni la plasticité à chaud, ni la stabilité physico-chimique n'interviennent.

Une application et non des moindres de ce travail à froid du verre se rencontre dans l'industrie de l'optique. Ici on atteint des précisions absolues des cotes géométriques qui peuvent être de l'ordre de la longueur d'onde de la lumière et une qualité de poli des surfaces extrêmement élevé. M. Despois, qui est un spécialiste de la question dans ce laboratoire, exposera lui-même cet aspect du travail du verre dans un prochain article.

d. Décoration. — Nous reviendrons pour quelques instants au travail à chaud avec la décoration puisque l'on emploie le plus souvent des émaux déposés au pinceau sous forme de poudres de verre finement divisées, que l'on vitrifie au moyen d'une cuisson assez douce pour ne pas déformer la pièce de verre à décorer, mais suffisante pour assurer la vitrification complète de la poudre. Ces émaux peuvent être transparents ou colorés. Ce sont toujours des verres extrêmement fusibles dont la viscosité atteint des valeurs très faibles à des températures où les verres ordinaires sont encore indéformables. Nous citerons pour mémoire la décoration par peinture métallique (or, argent) et nous terminerons ce tour d'horizon par la gravure chimique, en disant qu'elle permet d'obtenir non seulement une gravure en creux transparente, mais toute une gamme de dépolis qui vont du grisé au blanc mat; il y a là encore tout un art.

Nous avons négligé bien d'autres procédés de travail, nous ne saurions avoir tout dit; citons pour mémoire pêle-mêle le rebrulage, la gravure au sable, la gravure à la roue, la taille au burin, les différents procédés de coupage, le verre doublé, craquelé, les agglomérations de poudres, etc.

e. Recuisson et trempe. — La recuisson est un traitement thermique qui a pour principal objet de réduire la fragilité en faisant disparaître les efforts mécaniques internes. C'est une opération difficile qui demande beaucoup de soin et a été longtemps une grosse préoccupation pour les ingénieurs verriers. Depuis certains travaux, comme ceux de Lebedeff et de Mme Winter-Klein, on sait que les phénomènes sont très complexes et ne mettent pas seulement en jeu une élimination des tensions internes.

La trempe consiste au contraire à communiquer des efforts judicieusement répartis obtenus par un brusque refroidissement dans l'air ou dans des bains liquides, de manière à accroître la solidité mécanique, la résistance au choc thermique ou obtenir une fragmentation en poudre inoffensive en cas de rupture. La gobeletterie dite « incassable », la glace « Securit » sont connues de tous. On ne peut quitter ce chapitre sans citer le nom de B. Long (1) promoteur en France de splendides réalisations industrielles de verres trempés, mais c'est surtout à l'étranger que les applications ont ont été étendues. Toutefois ce procédé est connu depuis fort longtemps, les Cristalleries de Baccarat fabriquent depuis de très nombreuses années des verres pour lampes de mineur dont la résistance à l'échauffement par la flamme est obtenue par une trempe soigneusement étudiée.

Si l'on jette maintenant un regard sur le travail du verre dans les ateliers de fabrication des tubes à vide vers les années 1936-1937 et souvent bien plus récemment, on est stupéfait de s'apercevoir que seuls le travail au chalumeau, les pièces soufflées tournées et le tube étiré y sont utilisés; que le verre pressé n'a encore fait qu'une timide apparition, le verre « pistonné », le travail à froid, les applications industrielles du décor, y sont inconnus. On sait mal recuire, et l'on se préoccupe peu du problème. Quant à la trempe systématique, elle est pratiquement ignorée.

Problèmes spéciaux à la verrerie pour tubes à vide.

Pour bien comprendre les progrès actuels, il importe de poser le plus nettement possible l'ensemble des problèmes verrerie qui préoccupent le radioélectricien.

Dans la construction des tubes à vide, le verre est avant tout une enveloppe étanche, capable de supporter les meilleurs vides, sans tension de vapeur aussi bien à froid qu'aux températures relativement élevées où l'on pratique l'étuvage, opération destinée à hâter l'élimination des gaz. Ces températures d'étuvage sont toutefois limitées par le ramollissement du verre, ce qui peut avoir des inconvénients, à commencer par la lenteur des dégazages, surtout dans le domaine des grosses lampes. Il est nécessaire que cette enveloppe supporte bien les chocs mécaniques accidentels et les différences de température qui apparaissent en fonctionnement entre des points voisins. Le verre doit donc être solide, résistant au choc thermique, et présenter une température de ramollissement élevée, et non; ces qualités étant d'autant plus nécessaires que l'on a affaire à des lampes plus poussées.

Mais il faut encore que cette enveloppe soit capable d'assurer le passage des courants, c'est-à-dire qu'elle soit traversée de corps conducteurs qui aboutissent aux électrodes. Pour y parvenir on a généralement recours à des soudures verre-métal dont l'étude est assez importante pour justifier un paragraphe spécial de cet exposé. Quelle que soit la forme de ces soudures, elles sont toujours rigides. Comme il faut bien fixer les électrodes les unes par rapport aux autres, on a très vite pris l'habitude d'utiliser des traversées métalliques fixées à l'enveloppe comme support, en s'aidant quelquefois même pour parfaire l'architecture de « piquages » ou tiges métalliques rigides sans fonction électrique, noyées dans le verre. De ce rôle de support qui fixe la géométrie du montage découle la nécessité d'une grande précision des cotes de la verrerie, précision qui doit être maintenue au cours de toutes les opérations de façonnage auxquelles la construction donne lieu. Cette condition devient de plus en plus impérative à mesure que l'on s'élève en fréquence, que les dimensions sont plus grandes devant la longueur d'onde et que l'on doit éviter davantage la présence d'entretoises de soutien d'électrodes.

Enfin le verre est un isolant et c'est l'une de ses principales fonctions dans les ampoules de T. S. F. A froid ce serait un isolant parfait sans une conductibilité superficielle qui n'est pas le moindre souci des constructeurs d'électromètres, mais qui préoccupe généralement assez peu les lampistes. Cette conductibilité est due à une couche d'eau plus ou moins chargée de sels enlevés au verre et disparaît pratiquement dès 140°; elle est déjà très faible à 100°. La conductibilité interne suit sensiblement une loi exponentielle en fonction de la température. Cette conductibilité a lieu par transports d'ions, ce qui revient à dire que sous action d'un champ électrique continu une électrolyse se produit. Les ions viennent se décharger sur les traversées métalliques, le contact verre-métal se modifie, et pour peu que le

phénomène soit important, on observe soit une fêlure, soit un décollement. L'accident n'est d'ailleurs pas seulement fonction du courant ionique qu'on pourrait lire par exemple sur un milliampèremètre, mais aussi de la nature des ions, c'est-à-dire de la composition chimique du verre et des conditions de leur libération au contact du métal.

Considéré comme diélectrique, le verre a des pertes qui croissent avec la température. Ces pertes sont responsables d'échauffements qui, à leur tour, accroissent les pertes. Le phénomène est auto-accélérateur et si la puissance ainsi absorbée n'est pas limitée, on assiste au ramollissement et au percement de l'enveloppe. De toutes façons il y a un gaspillage redoutable d'énergie.

Le verre présente d'autre part une constante diélectrique (comprise entre 5 et 7 pour les verres courants) qui est responsable de capacités non négligeables que l'on a intérêt à réduire le plus possible. Elles entrent en effet dans les capacités interélectrodes et leur importance fixe l'importance de la puissance haute fréquence absorbée en pertes dans le verre. Pour obtenir cette diminution des capacités on pourra chercher à diminuer la valeur de la constante diélectrique, mais surtout agir sur la répartition géométrique des amenées de courant.

Ainsi, l'utilisation du verre en tant qu'isolant conduit à rechercher de fortes résistivités électriques (superficielles et internes), une température d'électrolyse élevée, des constantes diélectriques et des pertes haute fréquence faibles. Comme on ne saurait tout faire au mieux, on évitera des accidents irrémédiables comme le percement en élevant la température de ramollissement. En même temps les procédés de façonnage devront laisser au constructeur une totale liberté dans la répartition des passages métalliques conduisant aux électrodes sans qu'il soit obligé de tenir compte d'une exigence imposée par la verrerie. Ces qualités des propriétés physiques du verre et de facilité de fabrication devront être d'autant plus développées que la lampe sera plus poussée, c'est-à-dire qu'on cherchera à mettre de plus grandes puissances dans un encombrement moindre.

Nous aurons fait à peu près le tour des problèmes, à vrai dire assez spéciaux, que pose le lampiste au verrier lorsque nous aurons parlé de la fermeture des tubes à vide.

Lorsque le montage d'une lampe est terminé, l'ensemble se présente généralement en deux pièces à la manière d'une boîte qu'il faut fermer. On obtient ce joint le plus souvent à l'aide d'un scellement verre-métal ou verre-verre. Ce scellement a l'allure d'une soudure de dimension toujours grande par rapport à l'encombrement de la lampe puisqu'il faut pouvoir engager le montage. Il est pratiqué à chaud dans les techniques courantes et suivi obligatoirement d'une recuisson si rapide soit-elle, le verre après ramollissement accumulant pendant le refroidissement des tensions internes si l'on n'y prend pas garde. Or le montage contient le plus souvent des organes chimiquement très fragiles (cathodes à oxydes, plaques zirconiées, etc.) qui ne peuvent séjourner sans destruction aux températures où ces soudures sont effectuées. Il est par suite nécessaire que la « fermeture » soit réalisée dans des conditions spéciales qui garantissent l'étanchéité et la solidité du joint et en même temps la vie des organes fragiles. La difficulté s'accroît avec la diminution de l'encombrement qui rapproche les organes sensibles des zones de soudure et facilite leur échauffement. Nous reviendrons longuement sur ce problème dans la suite de cet exposé.

En résumé, la construction des tubes à vide exige la coexistence de nombreuses qualités des propriétés physiques du verre; elle demande une grande précision des cotes de la verrerie et la mise en œuvre de moyens assez satisfaisants pour que le façonnage n'apporte pas de contrainte dans l'organisation géométrique des montages, compte tenu de la nécessité d'effectuer certaines opérations en présence de pièces fragiles qui ne supportent que dans des conditions très limitées un séjour aux hautes températures.

Ces exigences ne cesseront de devenir plus aiguës à mesure que s'accroîtra la tendance à descendre en longueurs d'onde, à diminuer l'encombrement et à augmenter la puissance, pour un volume déterminé, la première tendance entraînant les deux autres.

Dans ce qui précède, lorsque nous avons envisagé le rôle du verre comme enveloppe, nous n'avons pas voulu restreindre l'étude aux lampes tout-verre. Il est entendu que le métal ou des matériaux céramiques pourront tenir une grande place, mais les problèmes demeurent sensiblement inchangés pour la partie réduite de l'enveloppe qui est en verre. Ce serait d'autre part une erreur, à notre sens, de chercher à résoudre systématiquement les difficultés de verrerie en les rejetant par l'emploi du métal. D'une part les difficultés essentielles subsistent, d'autre part la présence de zones conductrices massives ne va pas toujours sans inconvénients. C'est une contrainte pour le constructeur et l'on se ferme la richesse de possibilités qu'offrent les verres, possibilités dont on aura quelques exemples en examinant les résultats obtenus par le laboratoire.

Les deux questions verre-métal sont indissolublement liées; il faut puiser aux deux sources selon les problèmes. C'est pourquoi il devient nécessaire pour la clarté de dire quelques mots des métaux soudant aux verres.

Les métaux soudants.

Nous ne parlerons que des métaux dont dispose l'industrie française, c'est-à-dire dont nous ayons l'expérience de l'exploitation ou qui ont fait l'objet d'études du laboratoire.

On peut les diviser en deux groupes, en considérant la forme des courbes de dilatation; il se trouve que l'on obtient le même classement si l'on fait appel aux facilités d'usinage.

Nous rangerons dans le premier groupe les métaux dont la courbe de dilatation ne présente dans sa partie utile, c'est-à-dire en dessous du ramollissement des verres, aucune anomalie. L'allure est à peu près parabolique (*fig.* 14). Ces métaux sont

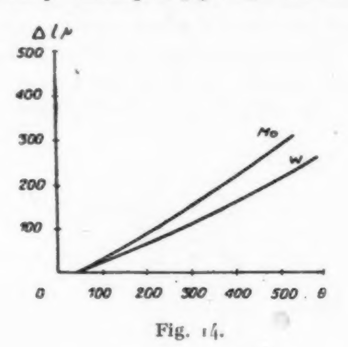


Fig. 14.

difficilement usinables et l'on se contente de les employer sous forme de fils, de ronds ou de rubans. Ce sont le tungstène et le molybdène.

Non ferromagnétiques, assez bons conducteurs, très réfractaires, très rigides à froid, ce sont des métaux de choix chaque fois que l'on peut se contenter de traversées de formes rudimentaires. La faible variation du coefficient de dilatation en fonction de la température permet l'enrobage par les verres sans considération de la température de transformation de ces derniers. On sait en effet que les verres présentent un domaine de température (proche de 500° pour les compositions usuelles) dans lequel toutes les propriétés physiques, en particulier le coefficient de dilatation, varient très rapidement. Ce domaine est appelé « domaine de transformation ».

La faible valeur de la dilatation du tungstène et du molybdène (*voir* tableau ci-dessous) permet d'employer des verres très robustes au choc thermique. Par contre, ces métaux sont très oxydables et l'attaque par les agents atmosphériques dans les conditions de climats coloniaux conduit à des accidents (fêlures le long de l'enrobage) que l'on doit combattre par des artifices ou par la qualité du verre, surtout dans le cas du molybdène beaucoup plus actif que le tungstène.

L'impossibilité presque totale d'usinage, qui restreint beaucoup leur emploi, est en outre une grosse infériorité de ces métaux.

Les métaux du second groupe, présentant un coude de la courbe de dilatation en fonction de la température, sont des alliages fer-nickel et fer-nickel-cobalt (platinite et Dilver P d'Imphy, Kovar américain). Cet accident que l'on remarque sur la courbe représentée figure 15 se situe à des tempé-

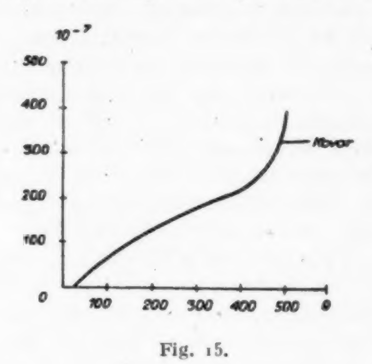


Fig. 15.

ratures assez basses pour que certains verres peu fusibles n'aient pas encore atteint leur domaine de transformation au moment où l'allongement du métal se met brusquement à croître. Comme, dans ces conditions, le verre n'est pas susceptible de déformations plastiques, il y a rupture de la soudure verre-métal même si les coefficients de dilatation du verre et du métal sont convenablement accordés dans la région des basses températures. Si, au contraire, le verre est mou avant la transformation du métal ou si les deux domaines de transformation coïncident, la soudure est possible et conduit dans le dernier cas à des efforts internes singulièrement réduits à toutes températures.

Ces métaux sont ferromagnétiques, médiocres conducteurs, moins rigides que les précédents. Ils doivent subir un traitement thermique de dégazage sous vide ou dans l'hydrogène pour éviter la formation de bulles au moment de l'enrobage. De ces inconvénients, c'est surtout le ferromagnétisme qui est le plus grave pour le radioélectricien, d'autant plus que la fréquence est plus élevée; il ne cesse

qu'au delà du point de Curie, c'est-à-dire au-dessus du coude de dilatation, à des températures où le fonctionnement des tubes est pratiquement impossible. Par contre, ces métaux sont très résistants à l'oxydation aux températures ordinaires et, avantage très important, ont de bonnes qualités métallurgiques.

Ce rapide tableau montre que tout ne va pas pour le mieux, et le problème reste posé d'un métal idéal qui serait bon conducteur, non ferromagnétique, résistant à l'oxydation, facilement usinable, de dilatation inférieure à 60.10^{-7} sans coude de la courbe de dilatation en dessous de 480° C environ. Nous n'osons pas ajouter à cette liste de revendications la condition de ne pas avoir besoin d'être dégazé avant l'emploi. Rien n'indique aujourd'hui que certaines contradictions qui découlent de ces qualités simultanées pourront être vaincues.

Nous avons vu que la variation assez brutale du coefficient de dilatation des alliages limite la valeur de la température de transformation des verres soudants. Il semble y avoir là une limite à l'élévation de la température de ramollissement. Des études menées au laboratoire ont eu pour objet de tourner systématiquement cette contrainte par l'emploi de verres intermédiaires; nous aurons l'occasion d'y revenir dans la suite. On peut aussi se proposer d'élever la température de transformation des alliages, en particulier des ferronickel-cobalt à un niveau suffisant pour qu'elle ne soit plus un obstacle, et le problème a été posé aux Aciéries d'Imphy mais, outre la difficulté technique de métallurgie, il n'est nullement certain qu'avec des verres exigeant des températures de travail très élevées, on puisse enrober le métal sans l'oxyder à l'excès ou le fondre.

D'autres métaux sont employés, mais leur utilisation est d'avance restreinte. Il s'agit du platine, du copperclad, du cuivre et des ferrochromes.

Le platine et les métaux rares ne peuvent être employés qu'au laboratoire ou dans des cas exceptionnels.

Le copperclad est un matériau composite utilisé en fils d'un diamètre rarement supérieur à 8/10e de millimètre, constitué par une âme de ferro-nickel recouverte de cuivre puis de borax. Il ne convient qu'aux petites lampes où son emploi est bien connu et largement développé. Comme il s'agit d'un métal mou, incapable de servir de support ou de broche, on l'utilise quelquefois brasé à un métal plus rigide, non soudable, noyé dans le verre comme représenté figure 16; le copperclad se soude aux verres à haute dilatation.

Le cuivre est évidemment un métal de choix eu égard à ses qualités électriques, mais sa dilatation est supérieure à celle des verres. On a recours pour l'employer à un artifice ingénieux qui consiste à réduire à une très faible épaisseur la partie enrobée

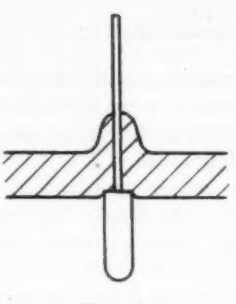


Fig. 16.

dans le verre. Les propriétés mécaniques du cuivre lui permettent de supporter les efforts dus aux différences de dilatation et de les absorber intégralement en se déformant. On a fabriqué sur ce principe des lampes de grande puissance, et c'est actuellement l'un des moyens les plus commodes pour accorder deux verres de dilatations très différentes (*fig.* 17).

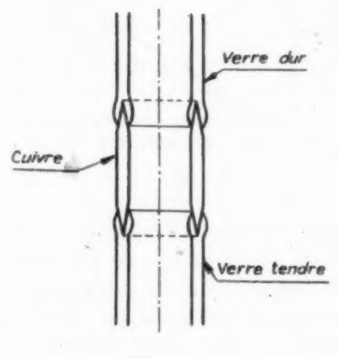


Fig. 17.

Mais la préparation du cuivre aminci est coûteuse, la fabrication des enrobages délicate. Le cuivre n'a toutefois pas dit son dernier mot dans les techniques de soudures verre-métal; l'excellente adaptation de ses propriétés physiques à la construction de matériel électrique doit raisonnablement conduire à son emploi étendu sur les tubes électroniques, toutes difficultés résultant de sa dilatation une fois vaincues.

Les ferrochromes sont d'utilisation courante en lampes de réception. Peu ferromagnétiques, peu oxydables, d'utilisation aisée (on les enrobe sans

dégazage préalable), rigides, ils ont des qualités métallurgiques acceptables. Leur coefficient de dilatation varie peu dans l'intervalle de température où le verre n'est pas plastique, mais il est très élevé, ce qui est une grosse infériorité de ces alliages. On ne peut en effet les souder qu'à des verres très dilatables, fragiles au choc thermique, de qualités mécaniques médiocres et dont l'emploi pour ces raisons n'est pas à conseiller sur les lampes de puissance.

Une diminution de 5 à 10 unités 10^{-7} du coefficient de dilatation de ces alliages, toutes choses égales d'ailleurs, serait un perfectionnement très appréciable, ne serait-ce qu'en permettant l'emploi des cristaux usuels.

Un tel métal, s'il existait, s'imposerait par ses qualités dans une foule d'applications et faciliterait peut-être la normalisation des verres « tendres » tous ajustés sur une dilatation unique que l'on aurait de bonnes raisons d'adopter.

Le Tableau I joint donne quelques caractéristiques des métaux soudants.

TABLEAU I.

Métal.	Dilatation α 20-100° en 10^{-7}.	Conductibilité thermique c/cm²/cm/°C/s.	Résistivité 20° µΩ/cm.	Forme d'utilisation courante.	Point de fusion.	Verre soudant.
Tungstène	$\alpha_{17-577°}$ 45	20° : 0,38	5,5	Fils, tiges, rubans	3 400° ± 50	T, Pyrex, G 702 P, etc.
Molybdène	$\alpha_{25-260°}$ 55,7	20° : 0,35	5,0	Fils, tiges, rubans	2 630 ± 50	Verres Moly Bagneaux, E, KM, P, etc.
Kovar, Dilver P.....	50		45,62	Toutes formes métallurgiques	1 450°	E, L
Platinite............	92		51,70	Toutes formes métallurgiques		Cristaux
Ferrochrome, Dilver O	97		83,35	Toutes formes métallurgiques		Cristaux
Dilver S............	104		39,70	Toutes formes métallurgiques		Cristaux
Platine	90,7	20° : 0,167	10,8		1 771	Cristaux
Copper-clad.........			15	Fils		Cristaux
Cuivre..............	165	20° : 0,92 265° : 0,888 625° : 0,842	1,72		1 083	Cristaux et certains verres durs s/amincis

Dans quelles conditions le contact verre-métal est-il étanche ? Quel accord de dilatation est-il nécessaire de maintenir pour garantir la solidité des joints ?

Ces problèmes ont été parmi les premiers auxquels se soit attaqué ce laboratoire, et la question était pratiquement réglée dès 1938 sous tous ses aspects modernes. Les résultats obtenus et les méthodes de recherches ont été particulièrement précieux, lorsqu'il s'est agi de mettre au point les verres radioélectriques spéciaux étudiés en 1940-1942.

Bien qu'un certain nombre de brevets étrangers revendiquent l'enrobage du verre sur la surface directe du métal, on s'accorde généralement à penser

qu'il est nécessaire d'interposer entre le verre et le métal une couche d'oxyde partiellement dissoute dans le verre et que l'importance et la nature de cette couche de transition fixent la solidité et l'étanchéité du joint. Les expériences que nous avons faites ont toujours confirmé cette opinion, surtout en ce qui concerne la solidité. L'aspect, singulièrement la couleur, de la surface du métal varie avec la nature et l'épaisseur de l'oxyde formé et son observation permet de contrôler la qualité du contact verre-métal, c'est-à-dire l'étanchéité.

Ce test de contrôle est établi une fois pour toutes grâce à des mesures classiques d'étanchéité et des épreuves de solidité mécanique. Il faut savoir reproduire systématiquement la soudure favorable. Comme il s'agit d'atteindre un degré d'oxydation déterminé et une certaine dissolution de l'oxyde dans le verre, deux facteurs prépondérants interviennent : la température et la pression d'oxygène qui président à la soudure du verre sur le métal, opération que l'on appelle « enrobage ». Si l'enrobage est pratiqué à la flamme, par exemple au chalumeau, les conditions sont mal définies et la réussite est liée à l'habileté de la main-d'œuvre qui accomplit ces travaux d'une manière généralement très primitive.

L'opérateur est au contraire presque complètement maître de la température et des conditions chimiques oxydantes ou réductrices lorsque l'enrobage est effectué dans un four étanche, ou lorsque la chaleur nécessaire à la fusion du verre est apportée par le métal à enrober lui-même dans lequel circulent des courants importants, soit directs (enrobages par effet Joule), soit induits (enrobages H. F.).

Certains brevets étrangers préconisent l'emploi de sels métalliques déposés à la surface du métal pour faciliter la formation d'un « bronze » de transition favorable. Avec aucun des métaux soudants que nous avons cités, cet artifice n'est indispensable.

Le laboratoire s'est de bonne heure attaqué à la réalisation d'enrobages par chauffage H. F. et, dès 1940, le problème était pratiquement résolu dans ses principes. L'effort d'application s'est poursuivi dans les ateliers de fabrication et a permis la réussite de lampes de très grandes puissances déjà bien connues. Comme on ne peut mettre la haute fréquence partout et que c'est un procédé coûteux, la fabrication rationnelle de petits enrobages à la flamme sur machine automatique à grand débit a été étudiée. Le lecteur trouvera ci-dessous tous renseignements sur ce sujet dans la partie de cette étude rédigée par M. Commin.

Le problème de l'accord des dilatations respectives du verre et du métal a été étudié au laboratoire avant la guerre. Les résultats suivants proviennent de ces travaux déjà anciens : l'accord des dilatations est évidemment nécessaire puisque les deux solides sont liés rigidement, mais verre et métal sont capables de supporter certains efforts dans des conditions qu'il s'agit de préciser. La courbe de dilatation d'un verre recuit (*fig.* 18) présente deux parties

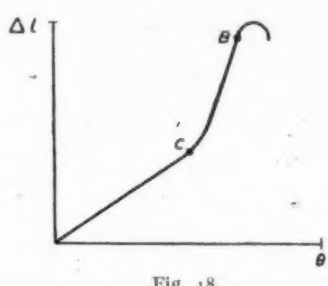


Fig. 18.

à peu près rectilignes, mais de pente différente, raccordées par un coude à grande courbure qui définit le domaine de transformation. Dans ce domaine la viscosité cesse brusquement d'être infinie ou pratiquement infinie et décroît pour permettre au verre aux environs du point B d'annuler les efforts internes par déformation plastique; l'élimination de ces efforts n'est pas instantanée, elle est d'autant plus rapide que la température est plus élevée et que les efforts sont plus grands. En C elle est infiniment lente. Seul doit donc être pris en considération dans l'étude des efforts le long des scellements verre-métal le domaine des températures inférieures à l'abscisse du point B, point où le verre a le temps de relâcher ses tensions avant qu'une rupture ne se produise. L'expérience montre que B fait partie de la seconde section rectiligne de la courbe de dilatation.

Si l'on représente sur la même figure les courbes de dilatation du métal et du verre, c'est-à-dire les allongements en fonction des températures (*fig.* 19), on met en évidence la différence des allongements, à une température donnée, segments tels que DE, proportionnelle à l'effort que doit supporter le verre lorsque l'équilibre thermique est atteint. On doit chercher à placer les courbes de telle sorte que le plus grand segment DE soit minimum, ce qui conduit à rejeter l'accord rigoureux des dilatations à basse température (*fig.* 20) et à choisir le verre de telle sorte que l'on obtienne la position réciproque de la figure 19, le point B ayant la même signification que sur la figure 18.

Dans ce raisonnement, nous avons supposé que le verre et le métal avaient même longueur à la température origine (ambiante), puisque les élongations y sont nulles pour l'une et l'autre et qu'elles doivent être évidemment rapportées à une même

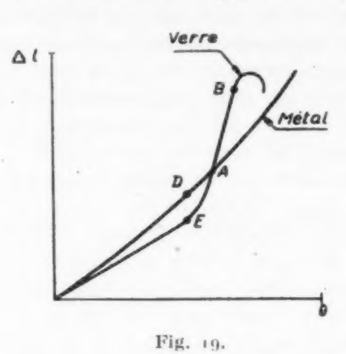


Fig. 19.

longueur. La réalité est moins simple. Lorsqu'on fait le scellement on se trouve dans un domaine de température très supérieur à la température du point B. Au refroidissement, le verre est d'abord mou et sa dilatation ne compte pas jusqu'à une certaine température variable avec la vitesse de refroidissement où il se comporte comme un solide,

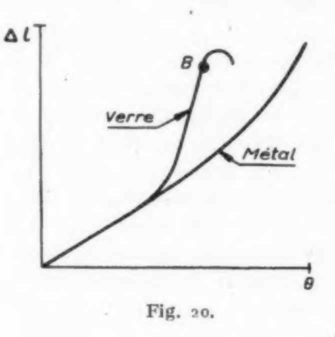


Fig. 20.

c'est-à-dire que sa viscosité ne lui permet plus d'annuler ses efforts internes par déformation. Ce phénomène est appelé « l'accrochage » du verre sur le métal. La température du « point d'accrochage » doit être regardée comme origine. On ne doit plus considérer les allongements mais les contractions à partir de cette origine. Les efforts internes sont proportionnels aux différences de ces contractions, ils peuvent très bien ne pas être nuls à froid, c'est-à-dire que si le verre et le métal étaient libres de leurs mouvements, ils n'auraient pas la même longueur à l'ambiante.

En faisant varier la vitesse de refroidissement, par exemple à l'aide d'un recuit, on fera varier le point d'accrochage et, par suite, les tensions internes de la soudure à l'ambiante. Étant donné la définition du point d'accrochage, il est clair que, pourvu qu'on se trouve à une température supérieure à celle du point C, c'est-à-dire dans une zone où le verre n'est pas infiniment visqueux, on pourra toujours s'arranger de façon que l'accrochage se produise à telle température que l'on voudra à condition d'y faire un séjour suffisant; autrement dit encore, on pourra, en arrêtant le refroidissement un temps suffisant après la fabrication de l'enrobage à une température donnée supérieure à C, laisser le verre relâcher complètement ses tensions, c'est-à dire s'accrocher sur le métal puis descendre assez vite en température pour qu'il n'y ait plus d'atténuation des efforts par déformation plastique. L'expérience confirme totalement ces vues et montre que par des recuits adéquats on peut avec le même verre et le même métal obtenir des compressions importantes du verre le long du passage, des tensions fortes ou une absence totale d'efforts.

Dans ce qui précède, il ne faut pas confondre le point B où la viscosité est telle que les tensions sont juste relâchées avant qu'une rupture du verre ne se produise, même si ces tensions sont considérables, avec le point d'accrochage où les tensions sont nulles par hypothèse.

Dans le cas où les efforts sont inexistants à froid, on peut se placer dans le cas de la figure 19 où le point d'accrochage est le point A. Dans le cas contraire, on aura des longueurs proportionnelles aux efforts internes en faisant subir une translation parallèle à l'axe des ordonnées à la courbe de dilatation du verre et en s'arrangeant de façon que les deux courbes se coupent à la température d'accrochage que l'on connaîtra en général puisqu'elle se confond pratiquement avec la température de recuit si cette dernière n'est pas exagérément élevée.

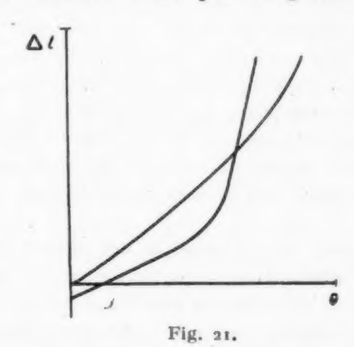


Fig. 21.

La figure 21 montre le cas d'un enrobage qui arrive finalement en compression (point d'accrochage

trop bas), la figure 22, le cas de tensions à l'ambiante (point d'accrochage trop élevé).

Pour les enrobages dans lesquels le métal est enrobé sur une longueur grande devant le diamètre, ces raisonnements faits sur une seule dimension reçoivent une remarquable justification de l'expérience. Lorsque plusieurs dimensions sont à considérer, tout se complique encore, et encore davantage, lorsqu'on envisage les efforts qui naissent à l'échauffement ou au refroidissement selon que le métal chauffe avant le verre ou inversement, comme c'est le cas pendant le fonctionnement des tubes à vide.

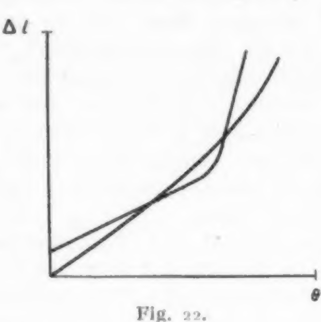


Fig. 22.

Une telle étude n'intéresse que les spécialistes et nous ne voulons pas abuser de la patience du lecteur, mais nous aurions atteint une partie de notre but si nous avions pu faire comprendre l'importance capitale du recuit dans les efforts résiduels des soudures verre-métal.

Pour la clarté, nous avons toujours dessiné sur les courbes figures 18 à 22 des allures de dilatation correspondant aux métaux du premier groupe (page 43). Si le métal présente un intervalle de transformation qui donne à la courbe de dilatation l'allure de celle d'un verre, on comprend qu'il est possible d'ajuster de beaucoup plus près les dilatations de manière à n'avoir à peu près jamais d'efforts internes. C'est ce qu'a fait M. de Freminville quand il a réglé le verre L sur le Kovar (1938), puis, en sens contraire, les Aciéries d'Imphy, quand il a fallu ajuster un métal français (le Dilver P) sur le verre L, et ce qui a été obtenu plus tard pour le verre E dans son accord de dilatation avec le Dilver P.

L'instrument de choix pour ces sortes d'études est, avec le dilatomètre, le polarimètre. On sait que le verre tendu est doué de biréfringence. La mesure de cette propriété optique renseigne quantitativement sur les efforts internes. Si l'échantillon de verre chauffé est dans un four, on peut faire cette mesure à toute température. Le laboratoire est équipé d'un polarimètre C. G. R. avec compensateur Tarbes et four; certains perfectionnements ont été apportés à l'appareillage que l'on trouve dans le commerce, et des processus d'essai ont été définis qui permettent pratiquement de connaître en une journée les possibilités d'un verre, et avec les moyens dont nous disposons pour agir sur la dilatation des verres, de régler en trois ou quatre jours la dilatation d'un verre soudant à l'un quelconque des métaux décrits plus haut.

En résumé, la soudure verre-métal exige des métaux spéciaux dont on connaît toute une gamme, mais dont aucun ne réunit une somme de qualités complètement satisfaisante. Pour obtenir l'étanchéité on intercale systématiquement entre verre et métal une couche d'un oxyde défini partiellement dissous dans le verre, dont la formation n'a lieu que dans des conditions étroitement limitées; on peut avoir un bon contrôle du contact verre-métal par l'observation oculaire à condition que les soudures soient accessibles à cette observation. La question des accords de dilatation est complexe, les tensions internes étant fonction à la fois des coefficients de dilatation du verre et du métal, de la température à laquelle on a recuit pour la dernière fois le scellement et des conditions de fonctionnement des lampes.

Dans la majorité des cas on pourra compenser certaines insuffisances des métaux ou de l'accord de dilatation par des artifices comme, par exemple, une mauvaise conductibilité par un allongement des traversées, mais il est évident qu'un progrès fondamental sera atteint le jour où l'on sera complètement débarrassé de la nécessité d'accorder les dilatations si peu que ce soit.

Il est permis de penser que cette nouvelle porte sera bientôt ouverte, le radioélectricien pouvant alors choisir le métal le plus conducteur et le meilleur diélectrique.

Mise en œuvre de verres spéciaux pour tubes électroniques.

Nous sommes maintenant assez avancés dans notre sujet pour pouvoir dresser la liste des qualités que l'on doit attendre d'un bon verre radioélectrique.

Groupe I.

a. Fonte et affinage en verrerie excellents;

b. Bonnes qualités de travail à la canne et à la presse;

c. Bonnes qualités de travail au chalumeau;

d. Grande stabilité chimique à haute température;

e. Faible sensibilité à la composition chimique des flammes;

f. Élimination facile des tensions internes.

Groupe II.

g. Bonnes qualités mécaniques;

h. Bonne résistance au choc thermique;

i. Grande résistance à l'attaque par agents chimiques et en particulier par l'eau;

j. Faible absorption optique.

Groupe III.

k. Dilatation soigneusement accordée sur celle d'un métal conducteur.

Groupe IV.

l. Température de transformation élevée;

m. Résistivité élevée, grande résistance à l'électrolyse, pertes et constante diélectriques aussi faibles que possible.

Les propriétés *a*, *b*, *c*, *d*, *e* règlent le prix de revient et la présentation. Elles sont imposées par les conditions de travail des verreries et des ateliers de soufflage de verre. *f* est surtout imposée par les conditions du recuit qui suit la fermeture.

Les propriétés *g*, *h*, *i*, *j* sont communes à tout bon verre industriel. On devra rechercher le mieux sans viser au record, cependant la résistance au choc thermique intervient d'une manière spécialement importante parce que les lampes modernes travaillent beaucoup thermiquement.

La résistance à l'attaque par agents chimiques atmosphériques est nécessaire aux colonies. Dans nos climats elle permet un long stockage du verre sans précautions spéciales, elle diminue la résistivité superficielle, la couche d'eau qui se dépose à la surface du verre par temps humide n'étant pas retenue par un tissu poreux comme lorsque le verre est attaqué et n'étant pas chargée d'électrolytes enlevés au verre. L'absorption de la lumière visible et de l'infrarouge lointain règle en partie la température du verre pendant le fonctionnement des tubes électroniques.

L'exigence *k* relative à l'accord de dilatation avec le métal conducteur des traversées de courant doit être d'autant plus étroitement observée que ces traversées sont de plus grandes dimensions et de formes plus compliquées, c'est-à-dire à mesure que l'on gravit l'échelle des puissances des tubes à vide.

Nous avons vu comment s'introduisaient les conditions du groupe IV qui se déduisent de l'emploi du verre comme enveloppe et comme isolant. L'élévation de la température de transformation ou, ce qui revient au même, de la température de ramollissement, soulève toutefois quelques objections. Comme conséquence, les températures de façonnage et de recuit sont accrues, ce qui complique le travail des verriers, singulièrement la fermeture des tubes en fin de construction. Les installations de recuit sont plus coûteuses et exigent des soins spéciaux, surtout en cette époque où les fils de résistance de qualité sont introuvables.

Il s'agira de trouver le bon compromis. Cette notion de compromis domine d'évidence toute cette question des qualités du verre.

Les exigences les plus difficilement conciliables sont celles du groupe I et du groupe IV, surtout si l'on s'attache à disposer d'un verre qui se travaille bien au chalumeau de souffleur.

Les verres que l'on trouve couramment employés sont, pour les basses dilatations, des borosilicates, c'est-à-dire des verres où les éléments SiO_2, B_2O_3 dominent et, pour les hautes dilatations, des cristaux (PbO 20 à 30 %).

Comme exemple de borosilicates, citons parmi les plus connus, le Pyrex, le G 702 P, le G 705 A 3 de la Corning, le verre Moly de Radiotechnique, un verre Osram dont on trouvera la composition et quelques caractéristiques dans le Tableau II ci-joint. Ce tableau donne également la composition d'un cristal courant et à titre d'exemple de cristal plus complexe, un verre de la Corning [2].

Les verres à la chaux qui sont les verres industriels de beaucoup les plus importants (glaces, vitres, bouteilles, etc.) sont à peu près inconnus en technique radio. Ce sont des verres secs, beaucoup plus difficiles à recuire que les cristaux.

Borosilicates et cristaux étaient connus et exploités alors que la radioélectricité en était encore à ses balbutiements ou inexistante. Les cristaux étaient utilisés depuis des siècles; les borosilicates avaient vu leur plein épanouissement avec le Pyrex vieux de plus de 25 ans. Il s'est trouvé que les cristaux avaient d'excellentes propriétés électriques, mais on doit avouer qu'il s'agit là d'une heureuse coïncidence. Quant aux borosilicates, leurs qualités électriques sont médiocres et pour les verres très chargés en acide borique que l'on a coutume d'utiliser en France pour la soudure au molybdène, la résistance aux agents chimiques atmosphériques est mauvaise.

A notre connaissance, les efforts faits depuis que la radio a posé ses propres problèmes pour améliorer les qualités des verres, ont presque tous consisté

TABLEAU II.

	Pyrex (1).	G 702 P Monex (1).	G 705 A_3 (1).	Moly Radiotechnique.	Verre Osram (3).	Cristaux. Ordinaire (3).	Cristaux. Corning (2).
SiO_2	80,75	73,00	67,00	66,500	74,00	61,4	57,7
Na_2O	4,10	4,50	6,50	7,600	7,20	10,92	3,7
K_2O	0,10			0,050		1,47	8,9
CaO	0,30	–	–	0,750	1,10	1,1	–
Al_2O_3	2,20	–	2,00	1,020	3,10	0,95	–
PbO	–	6,00	–	–	–	19,61	20,5
ZnO	–	–	–	–	–	3,95	–
BaO	–	–	–	–	2,30	–	6,9
B_2O_3	12,00	16,50	22,00	22,800	11,40	–	1,0
As_2O_3	0,25	–	–	FeO 0,770	–	0.15	–
Fe_2O_3							
R_2O_3	–	–	–	–	–	–	1,3
α	33	36	46	52	50	–	89
Résistivité à 350°	–	–	–	–	–	–	$160 . 10^6$ Ω/cm
Tk 100	183	–	–	–	–	–	–
Métal soudant	W	W	–	Moly	Moly	Copper-clad Platinite	Copper-clad

(1) D'après Espe et Knoll.
(2) Brevet français 684 667 Corning Glass Work.
(3) D'après une analyse chimique.

jusqu'à la guerre à perfectionner par des modifications de détail les compositions déjà connues, de manière à gagner quelques points sur la résistivité, l'attaque par agents chimiques, l'accord de dilatation (1). On en voit deux exemples dans le Tableau II avec le verre Osram soudant au molybdène et le cristal de la Corning. Les formules sont complexes; on y trouve deux alcalis et non plus seulement Na_2O à côté d'alcalino-terreux qui sont absents des autres formules, mais les constituants fondamentaux restent pour le verre dur : la silice et l'acide borique, et SiO_2 PbO pour le cristal. Nous avons déjà eu l'occasion de citer à propos de l'accord au Kovar, le verre L qui dérive du verre Moly Radiotechnique et de certaines compositions de Bagneaux et que M. de Fréminville avait étudié pour lui donner une bonne résistance à l'attaque à l'eau et par agents acides. A son apparition le verre L présentait une incontestable supériorité à ce dernier point de vue sur les verres américains concurrents.

Mais aucun verre satisfaisant d'une manière suffisante aux exigences de plus en plus impératives posées par la construction des lampes modernes n'existait au début de la guerre. Des recherches systématiques de longue haleine furent commencées en octobre 1940. Elles furent entreprises en collaboration avec les Cristalleries de Baccarat alors dirigées par M. de Fréminville qui était toujours conseil du laboratoire. M. de Fréminville avait adopté pour ces essais l'idée directrice suivante : « les verres riches en plomb cumulent une foule de qualités intéressantes; ils n'ont été pratiquement exploités que dans le domaine des hautes dilatations. Si l'on peut parvenir à introduire de fortes teneurs en plomb dans un verre à basse dilatation, on doit obtenir à côté des qualités propres des verres à basse dilatation (solidité au choc thermique, soudure aux tungstène, molybdène, kovar), l'ensemble des qualités connues des cristaux à haute dilatation ».

Les premiers essais firent apparaître des difficultés inattendues, mais après quelques mois, la

(1) Par contre des recherches de compositions chimiques très spéciales ont été menées dans le domaine de la verrerie pour tubes à vapeur métalliques, et ont conduit à des verres de structures chimiques complètement inconnues auparavant (verres sans alcalis, sans silicium, etc.).

voie ainsi tracée était ouverte par la réalisation pratique de verres dont on peut dire qu'ils tenaient en germe tous les succès futurs; hélas l'animateur de ces travaux ne devait pas en voir l'aboutissement, ayant été arraché à la respectueuse affection de tous le 18 septembre 1941. Il ne restait à ses collaborateurs et élèves meilleur moyen d'honorer sa mémoire que de mener à bien les travaux entrepris.

L'étude fut donc poursuivie d'arrache-pied, elle devait aboutir le 23 mars 1942 à la première fonte en grand pot de 900 kg du verre KM, et plus tard aux verres E et T.

Le cristal type qui a servi de point de départ est le cristal dit « de Luxe » dont la composition est voisine de : SiO_2 56 %, PbO 31 %, $Na_2O + K_2O$ 13 %, connue et publiée depuis longtemps. Les verres de ce type ont les caractéristiques suivantes : fusion et affinage faciles, courbe de viscosité en fonction de la température très favorable aux procédés de façonnage à chaud, grande facilité de recuit, bonnes qualités mécaniques, excellente résistance à l'attaque par l'eau malgré la teneur élevée en alcalis, grand indice de réfraction, bonnes qualités électriques.

Pour abaisser la dilatation, il est connu que l'on doit diminuer la teneur en alcalis. Le problème était donc de remplacer les 13 % d'alcalis par une combinaison des oxydes couramment utilisés dans les verres : B_2O_3, Al_2O_3, ZnO, CaO, MgO, P_2O_5, As_2O_3. L'étude du rôle de ces différents oxydes en présence d'oxyde de plomb a conduit aux résultats suivants, très rapidement résumés :

1. L'alumine joue dans les verres au plomb peu alcalins un rôle remarquable de stabilisant, spécialement lorsqu'il y a de l'acide borique. Cet accroissement de la stabilité physico-chimique s'accompagne d'une réduction de la dilatation.

2. La facilité de faire apparaître du plomb à l'état métallique par chauffage en flamme réductrice est variable dans de larges limites; les additifs peuvent être classés suivant leur rôle de protection contre le noircissement, l'alumine intervenant de beaucoup comme le protecteur le plus efficace.

3. Lorsque la teneur en alumine excède environ 6 %, les verres présentent une forte tendance à donner un bouillonnement caractéristique quand on les chauffe fortement au chalumeau.

4. L'introduction d'alumine dans les verres au plomb peu alcalins provoque l'apparition d'une coloration qui va du vert au jaune serin, selon la composition de base sans que cette coloration puisse être imputée au fer sous son rôle normal, puisqu'elle disparaît quand on remplace PbO par ZnO ou BaO ou CaO dans les verres étudiés, alors que le minium employé est rigoureusement exempt de fer.

5. La potasse et la soude ont un comportement totalement différent en présence de fortes teneurs en Al_2O_3. Avec la potasse on arrive à des compositions pratiquement invitrifiables aux températures utilisées, alors que la soude (ou l'oxyde de zinc) donne des compositions extrêmement fluides (cette observation explique la corrosivité connue des compositions à la soude et au zinc vis-à-vis du réfractaire et la teinte plus agréable des verres à la potasse).

6. En faible teneur d'alcalins, l'acide borique se comporte dans les verres riches en PbO comme un élément peu stable, provoquant l'opalescence et donnant des dilatations anormalement grandes.

7. L'introduction d'oxyde de zinc facilite l'affinage, abaisse la viscosité à haute température, mais s'accompagne d'une tendance à la dévitrification pour des teneurs supérieures à 5 %.

8. En dessous de 48 % de silice, il est difficile d'éviter la dévitrification, ce qui interdit le travail au chalumeau. Par contre, il est alors possible d'introduire de fortes teneurs en Al_2O_3 et d'élever le pourcentage en PbO jusqu'à 35 %, ce qui conduit à des verres dont la solidité mécanique est considérable.

9. Les coefficients empiriques connus donnant la dilatation des verres en fonction de leur composition, échouent avec des écarts de l'ordre de 30 % avec les verres du système SiO_2, PbO, Al_2O_3 + additifs. Un autre jeu a été calculé qui donne satisfaction pour ces verres et pour de nombreux autres de composition chimique différente.

Dans les verres peu alcalins et au plomb, on vérifie que l'échange de soude et de silice permet de faire varier dans une grande amplitude la dilatation sans qu'il soit nécessaire de jouer sur de gros pourcentages, ce qui modifie peu les propriétés générales du verre. On peut ainsi ajuster facilement la dilatation, ce qui a permis d'étudier plusieurs verres adaptés à la soudure sur métal de gros diamètre (tungstène, molybdène, kovar).

10. Il a été vérifié, comme il est connu pour d'autres verres plus classiques, que la température de ramollissement était augmentée par l'échange d'oxyde de plomb en baryte, chaux et magnésie, mais cette dernière agit de beaucoup avec le plus

d'efficacité, de telle sorte qu'en jouant sur sa proportion dans le verre, il est possible de faire varier dans de larges limites, et pour ainsi dire à volonté, la valeur de la température de ramollissement sans que les autres propriétés du verre soient sensiblement modifiées.

11. Les mesures de solubilité effectuées sur des verres de dilatation 40 à 52.10^{-7} du système SiO_2, Al_2O_3, PbO + additifs ont donné des solubilités inférieures en milligrammes dissous à celles que l'on obtient avec les bons verres chimiques courants, en particulier le Pyrex.

12. Les mêmes verres conduisent à des pertes diélectriques environ trois fois plus réduites que celles des verres usuels et à des résistivités représentées par des points Tk 100 égaux ou supérieurs à 330°.

13. On a vérifié que les verres très faiblement alcalins ou exempts d'alcalins étaient d'autant plus faciles à fondre et à affiner que leur composition chimique mettait en jeu un plus grand nombre de corps. C'est à l'aide de cette observation qu'il a été possible de fondre et de faire travailler à peu près dans les conditions du cristal à haute dilatation des verres assez peu fusibles pour supporter un étuvage sous vide à 580° pendant 30 min et présentant par ailleurs un ensemble de propriétés intéressantes.

Ces résultats sont le fruit de très nombreuses mesures faites sur une série de plus de 200 verres d'essai.

Au cours de ce long travail expérimental, un nouveau système de coefficients caractéristiques des oxydes composants a été créé qui permet de prévoir la dilatation d'un verre avec une très grande précision et dans des conditions extrêmement générales; les principales propriétés physiques étudiées ont été : la fusion, l'affinage, la facilité de façonnage par tous procédés habituels, la résistance à la dévitrification, la sensibilité à la composition chimique des flammes, le pouvoir corrosif sur les creusets de fusion, la dilatation, l'accord verre-métal, certaines propriétés mécaniques, les températures de transformation, de recuit, de recuit sous vide, la solubilité dans l'eau, l'attaquabilité par la liqueur sulfochromique, les propriétés électriques.

Mais l'exposé des méthodes de mise au point et d'exploitation des compositions d'essai nous entraînerait trop loin; un article spécial sera d'ailleurs publié prochainement sur ce sujet; nous n'anticiperons que par quelques mots sur les mesures électriques.

Les courbes de résistivité (*fig.* 23) ont été établies en courant alternatif 50 p, la polarisation faussant les mesures en courant continu. Pour rendre possible la mesure avec des verres très dévitrifiables et sans avoir aucunement à se préoccuper d'un accord verre-métal, il a été nécessaire d'établir des échantillons de mesures qui n'utilisent pas de contact par métal enrobé et ne demandent pas de travail au chalumeau.

En ce qui concerne l'angle de pertes en H. F., dès qu'on arrive à de très bonnes qualités, la précision du Q mètre et du pont H. F. ordinaires devient insuffisante; nous avons déjà rencontré cette difficulté en céramique et M. Riethmuller a mis au point pour la vaincre une méthode et un appareillage spécial dont on trouvera la description détaillée dans un prochain numéro des *Annales*.

Au point de vue pratique [3], l'ampleur de l'étude permettait une exploitation très vaste des résultats. Des verres à 28 % de plomb ont été fondus dont la dilatation est inférieure à celle du verre Pyrex; de larges applications leur sont évidemment ouvertes. Deux verres dérivés du système SiO_2, Al_2O_3, PbO + additifs ont été exploités en fabrication dès octobre 1944. Il s'agit du verre T soudant au tungstène et du verre E soudant au molybdène. Ces verres présentent les propriétés communes suivantes : fusion, affinage, travail en verrerie excellent dans les conditions de température et d'appareillage habituelles au cristal de luxe, palier de travail très long, grande homogénéité de la pâte, dévitrification difficile à provoquer, ce qui permet le travail au chalumeau, à condition toutefois d'éviter la réduction du plomb à l'état métallique en flamme réductrice. Cette réduction est plus aisée à combattre qu'avec les verres étrangers à faible teneur en plomb connus; qualités de résistance aux chocs thermique et mécanique comparables à celles des verres connus de même dilatation : indice de solubilité très faible (6 à 8) qui classe ces verres parmi les moins solubles des verres neutres connus; coloration vert jaune caractéristique, pertes diélectriques à froid trois fois inférieures à celles des borosilicates équivalents.

Le verre T se soude au tungstène. Il supporte un étuvage sous vide à 540°.

La résistivité à 300° est environ 200 fois plus élevée que pour les verres utilisés jusqu'ici dans les ateliers S. F. R. Il a été exploité pour la verrerie de la lampe S. F. R. P 40. Le manque de tungstène a entravé son développement. La figure 24 donne la courbe d'absorption dans le spectre visible.

Le verre E a été spécialement étudié pour la

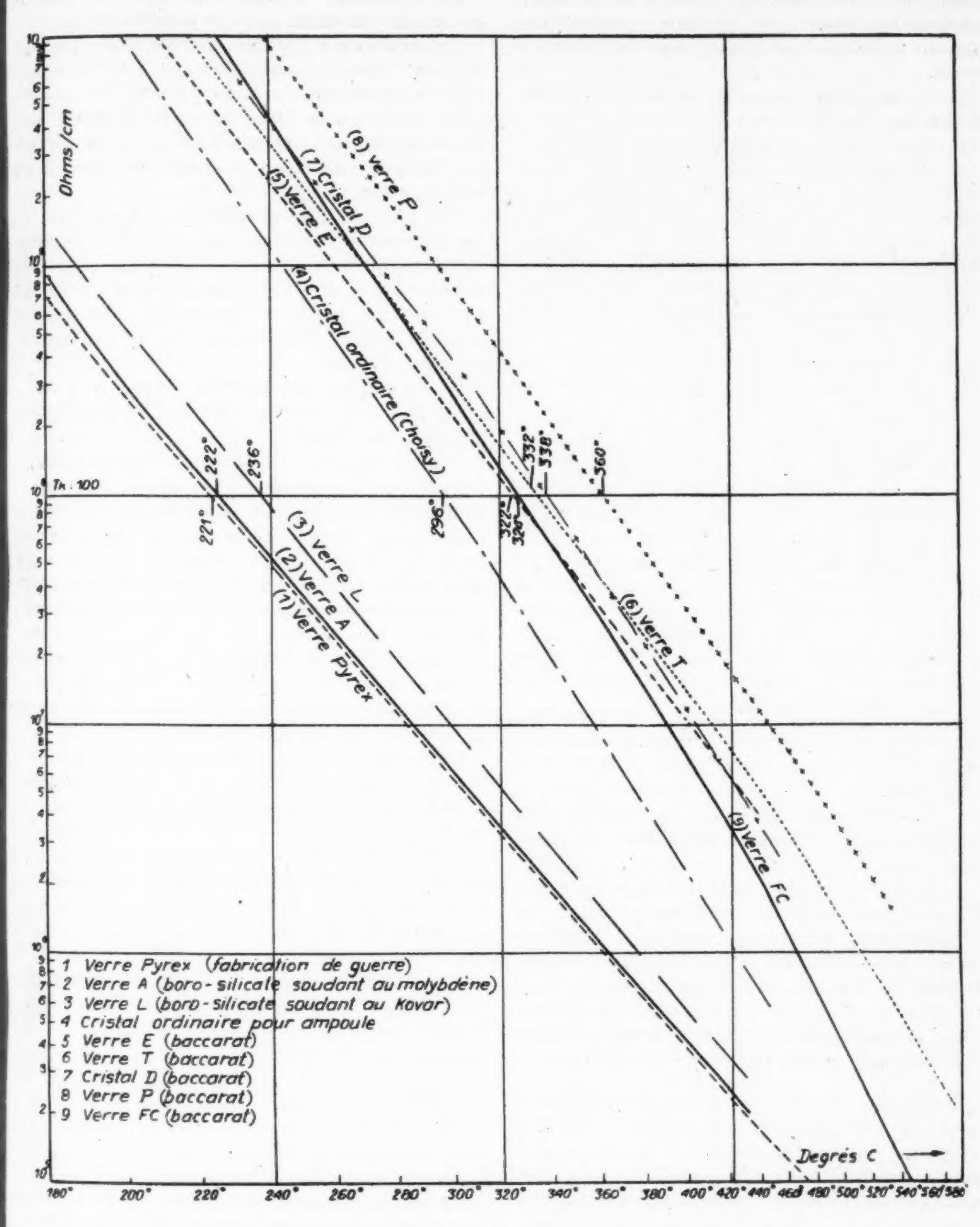

Ohms/cm
(8) Verre P
(7) Cristal D
(5) Verre E
(4) Cristal ordinaire (Choisy)
(3) Verre L
(2) Verre A
(1) Verre Pyrex
(6) Verre T
(9) Verre FC
Tk : 100
222°
236°
221°
296°
322°
326°
332°
338°
360°
1 Verre Pyrex (fabrication de guerre)
2 Verre A (boro-silicate soudant au molybdène)
3 Verre L (boro-silicate soudant au Kovar)
4 Cristal ordinaire pour ampoule
5 Verre E (baccarat)
6 Verre T (baccarat)
7 Cristal D (baccarat)
8 Verre P (baccarat)
9 Verre FC (baccarat)
Degrés C
180° 200° 220° 240° 260° 280° 300° 320° 340° 360° 380° 400° 420° 440° 460° 480° 500° 520° 540° 560° 580°

Fig. 23.

commodité du travail au chalumeau en faisant quelques concessions sur les autres propriétés de manière à habituer les souffleurs à ces sortes de verres.

En même temps on a ajusté le point de transformation sur celui du Dilver P, de manière à obtenir avec ce métal une soudure bien dépourvue de tensions avec ou sans emploi d'intermédiaire. La température de recuit est voisine de 510°. Cette valeur basse est remarquable pour un verre qui réunit des propriétés d'insolubilité, de bonnes qualités électriques et une basse dilatation. La résistivité à 300° est 35 fois plus grande que celle du borosilicate antérieurement employé dans nos ateliers.

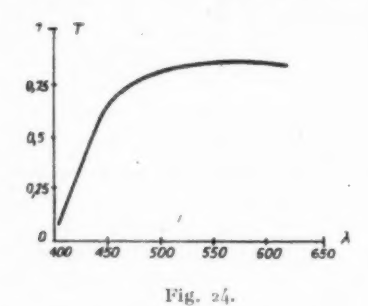


Fig. 24.

Des essais récents de durée effectués sur une lampe fortement chargée fonctionnant en statique ont donné les résultats suivants :

— Verre borosilicate normal; fêlure des enrobages due à l'électrolyse du verre après 60 h de fonctionnement.

— Verre nouveau présenté par une verrerie spécialisée en fournitures scientifiques : accident après 250 h.

— Verre E : aucune modification de la surface des enrobages après 450 h de fonctionnement. L'essai a malheureusement été interrompu par l'arrêt de l'usine dû aux restrictions d'électricité. Le résultat est d'autant plus remarquable que le verre E n'avait été utilisé dans ce test que comme verre de transition, la plus grande longueur d'isolant séparant les conducteurs restant en borosilicate normal.

La photographie n° 1 (1) montre quelques pièces venues de moule en verre T; les photos n°s 2 et 2 *bis* des pièces soufflées au chalumeau en verre E; la boule de grand diamètre (100 mm) que l'on peut remarquer au centre de la photo n° 2 a été soufflée à partir de tube de 26 mm de diamètre pour montrer les qualités de résistance à la dévitrification.

La résistance à l'attaque par l'eau qui apparaît sur les chiffres donnés Tableau III concernant l'indice de solubilité a été confirmée par un essai à l'étuve coloniale. Dans cet essai, quelques enrobages molybdène-verre E avaient été laissés, à côté d'enrobages semblables utilisant un borosilicate ancien, à 70° C en présence de vapeur d'eau saturante. L'observation comparée après un mois de séjour montrait une fêlure pour tous les échantillons de borosilicates et un léger décollement sans fêlure des enrobages verre E sur une faible partie de leur longueur. La partie de molybdène non enrobée était fortement attaquée et couverte d'aiguilles blanches d'oxyde.

Un échantillon de tungstène enrobé de verre T placé dans les mêmes conditions n'avait pratiquement pas évolué.

Par ses propriétés, le verre E doit être plutôt regardé comme une forme de transition qui prépare l'exploitation industrielle sans à-coup de verres dont la mise au point est achevée et qui présentent de meilleures qualités du groupe IV (*voir* page 49), mais dont l'exploitation entraînera certaines modifications d'appareillage, en particulier des installations de recuit.

Parmi ces verres, soudant au molybdène, figurent le verre KM qui supporte un étuvage sous vide à 540° et le verre P dont le point de ramollissement sous charge est supérieur à 590°.

Le Tableau III donne les compositions et quelques caractéristiques des verres T, E, KM, comparées à celles du borosilicate habituel utilisé pour la soudure au molybdène.

Sur le Tableau III on remarque les teneurs élevées en métaux lourds qui confèrent à ces verres un grand indice de réfraction et une forte opacité aux rayons X. Il y a là une nouvelle source d'applications possible.

Tous ces verres sont fondus par les Cristalleries de Baccarat dont la collaboration a été extrêmement précieuse. Nous avons trouvé auprès du personnel de l'usine de Baccarat un dévouement remarquable, prompt à s'intéresser à l'effort de recherches et à donner les conseils d'une expérience très riche dans tous les compartiments de l'art verrier. Nous désirons adresser ici nos remerciements au personnel dirigeant de cette compagnie pour la grande compréhension scientifique et technique qui a présidé à cette collaboration. Nous devons également signaler les travaux de M. Aubry, Ingénieur chimiste à Baccarat dans les années

(1) Les photographies sont rassemblées dans les planches hors-texte.

TABLEAU III.

	T.	E.	K. M.	Borosilicate ancien (1936).
SiO_2	52,4	50,00	51,88	
Na_2O	0,75	1,8	1,90	
K_2O	–	–	1,12	
Al_2O_3	5,00	5,00	2,30	
MgO	1	1,00	–	
PbO	29	28,7	18,00	
ZnO	2,55	1,00	4,50	
BaO	–	–	3,80	
B_2O_3	8,50	12,00	8,00	
As_2O_3	0,80	0,50	0,50	
Métal soudant	W	Mo Kovar	Mo	Mo
Indice de solubilité (1)	8	8	6	100
Point de transformation	540° env.	505° env.	540° env.	510°
Point de Littleton	680°	650°	675°	–
tg (10^{-4}) (2)	30	32	30	87
Tk 100	332	322	323	215
Résistivité à 300°	$3,5.10^8$	$2,5.10^8$	$2,5.10^8$	$1,5.10^6$

(1) L'indice de solubilité est le nombre de milligrammes passés en solution lorsqu'on fait bouillir pendant 5 heures 100^g d'eau distillée en présence de 10^g de verre en poudre admise au tamis n° 26 et refusée au tamis n° 28 (méthode des verreries allemandes).

(2) A froid sur $\lambda = 300$ m.

précédant immédiatement la première guerre mondiale, travaux dont la connaissance, malheureusement très insuffisante, a grandement aidé nos recherches.

La méthode de recherches de compositions vitrifiables nouvelles a été appliquée à d'autres types de verres et a permis notamment d'atteindre dans le domaine des hautes dilatations des pertes diélectriques deux fois plus petites que celles des verres dont il a été longuement question ci-dessus Des verres soudant au ferrochrome, à la platinite ou présentant des caractéristiques spéciales ont été également mis au point [4].

Procédés modernes de façonnage de la verrerie pour tubes à vide.

Si satisfaisants que puissent être les résultats qu'on obtient en agissant sur la composition chimique des verres, la nécessité d'obtenir des cotes verrerie précises avec une grande liberté des formes géométriques a conduit le laboratoire à étudier des procédés de travail nouveaux dont les uns sont des adaptations à la verrerie pour lampes des variétés de procédés connus depuis longtemps et que nous avons analysés page 39 et dont les autres sont caractérisés par l'emploi de l'énergie électrique sous ses différentes formes d'application comme moyen de chauffage.

L'une des qualités essentielles d'un procédé de façonnage est la rapidité d'exécution. C'est évident si l'on se place au point de vue des prix de revient, mais il est également très important de réduire au minimum le temps pendant lequel le verre séjourne aux hautes températures, de manière à éviter toute dévitrification. La dévitrification est en effet une destruction de l'état vitreux due à l'apparition d'éléments chimiques constitutifs du verre à l'état cristallisé. Le processus de naissance et de croissance des cristaux s'explique clairement à l'aide des courbes de Tamman (*fig.* 25). La courbe V représente la variation de la vitesse de croissance d'un cristal, c'est-à-dire la vitesse de développement d'un germe en fonction de la température. La seconde courbe donne le nombre N de cristaux apparaissant par unité de volume pendant un temps déterminé ou, si l'on veut encore, la densité de naissance des germes par unité de temps.

En dehors de l'intervalle de température commun à ces deux courbes, ou bien les germes peuvent grandir mais n'apparaissent pas, ou bien il y aura des naissances mais sans développement possible; un verre sera donc d'autant plus stable que l'aire hachurée sera plus réduite. Sauf dans le cas de très grande instabilité, les maxima sont en dehors de la zone commune.

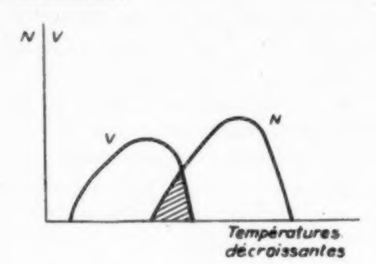


Fig. 25.

On comprend que si le verre séjourne peu de temps aux températures dangereuses qui coïncident sensiblement avec les températures de façonnage, la dévitrification aura peu de chance de se produire. Dans le cas contraire, le verre peut être détruit, la destruction étant encore facilitée si l'on procède par refroidissements et réchauffages successifs qui font passer de la zone où les cristaux peuvent naître à la zone où ils peuvent se développer le plus vite. Ces circonstances défavorables sont singulièrement rencontrées dans le travail au chalumeau de souffleur de verre.

a. Application à la verrerie pour tubes des procédés de façonnage à la canne et à la presse. — Les procédés de travail à la canne et à la presse que nous avons analysés au début de cet article, ont l'avantage de donner lieu à un façonnage rapide pendant lequel le verre est en descente constante de température ou soumis à un nombre de réchauffages très limité. La matière première est le verre en fusion, c'est-à-dire l'une de ses formes les plus économiques, l'outillage est peu coûteux et permet une grande souplesse d'utilisation.

1° Au procédé soufflé-tourné anciennement utilisé, on a substitué le procédé du pistonnage [5] qui permet de faire venir de moule des tubulures quels qu'en soient le nombre et leur position géométrique relative sur les corps creux. Les formes d'ampoules et de pieds de lampes peuvent ainsi être obtenues en une seule opération sans qu'il soit nécessaire de recourir à un complément de façonnage au chalumeau. Les cotes géométriques gagnent en précision par rapport à celles des pièces fabriquées par « soufflé-tourné », la fragilité est moindre que dans le cas des pièces pressées, les épaisseurs également plus faibles permettent de réduire les courants de fuite par le verre; la photographie n° 3 montre un échantillonnage de pièces en verre E utilisées dans la construction de pentodes de puissance et fabriquées par pistonnage.

2° Lorsqu'une pièce ne peut être obtenue en une seule opération et qu'un façonnage ultérieur est nécessaire, on a recours de préférence à un façonnage à froid par taille et polissage. C'est ainsi que l'on obtient les évasements des ampoules et des pieds à forme de coupelles. La figure 26 montre

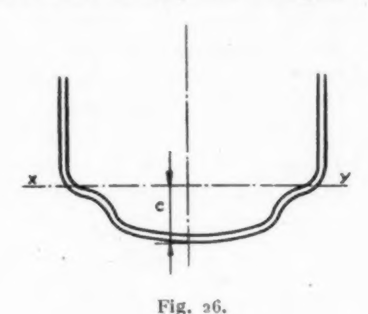


Fig. 26.

la forme de la pièce venue de moule. On coupe suivant le plan de trace XY ou légèrement au-dessus de cette trace, on meule et l'on polit de manière à obtenir pour chaque pièce une même cote c. L'évasement est ainsi venu de moule; toutes les dimensions en sont définies avec précision.

3° Le procédé de façonnage par pressage a été adapté à la fabrication directe de petits « pieds » de lampes à traversées métalliques multiples, l'effort du laboratoire étant surtout porté sur la simplicité des moyens et la souplesse d'utilisation de l'outillage, de manière à pouvoir passer sans modification pénible ni coûteuse d'un modèle de pied à un autre et à pouvoir opérer avec n'importe quel verre sans considération de ses facilités de travail (*cf.* 3e partie de cet article), et en utilisant surtout comme matière première de la baguette et non du tube, dont l'étirage économique exige un appareillage volumineux qui exclut la liberté d'utiliser tel verre que l'on veut.

4° Une application à la fabrication des ampoules d'oscillographes du soufflage pistonné [6] a permis de résoudre le problème que posaient les exigences sur la qualité de la « glace » de ces tubes. La glace est la partie de l'ampoule qui supporte l'écran et à travers laquelle on observe l'image due au pinceau

d'électrons. Tout défaut d'aspect de la surface interne ou externe du verre dans cette région de l'ampoule diminue les qualités de l'image, toute déformation géométrique par rapport à la surface idéale souhaitée par le constructeur, en général une calotte sphérique, entraîne des déformations désagréables à l'œil et responsables d'erreurs s'il s'agit d'un oscillographe de mesure. Le procédé soufflé-tourné conduit systématiquement à des rayures de moule et à des gondolages de la surface de la glace (ondes concentriques sur la face interne qui porte l'écran) dus à des accumulations très difficilement évitables de poussières de moule. Certains brevets étrangers font mention de glaces obtenues par pressage, travaillées optiquement puis soudées sur l'ampoule. Il est plus simple de pistonner sur de l'acier spécial très finement poli, la surface de l'acier étant rigoureusement reproduite par le verre. La photographie n° 4 montre trois modèles d'ampoules obtenues par ce procédé: la glace du plus petit exemplaire est plane, celles des deux plus grands sont sphériques.

L'étude de ces applications de procédés anciens à la verrerie pour tubes a été menée en collaboration étroite avec les Cristalleries de Baccarat qui ont bien voulu mettre à notre disposition et l'expérience du personnel de maîtrise en cette matière et la qualité exceptionnelle de leur main-d'œuvre verrière.

b. Procédés de façonnage utilisant l'énergie électrique comme mode de chauffage. — On connaît les avantages multiples du chauffage électrique, soit que l'on utilise l'effet Joule, les courants induits ou les pertes d'hystérésis diélectriques : souplesse de réglage, souplesse des conditions opératoires (moyennant certaines précautions on peut opérer dans telle atmosphère que l'on veut et même dans le vide), localisation précise des températures généralement accessibles aux prévisions par le calcul.

Dans les applications au travail du verre, les deux premiers avantages sont acquis d'eux-mêmes dès l'instant que l'on ne cherche pas à imiter en quelque sorte le travail au chalumeau, c'est-à-dire que l'on ne désire pas chauffer le verre par jet de gaz chaud, la température de ces derniers étant acquise par la transformation d'énergie électrique en chaleur, et que l'on n'emploie pas d'arcs toujours susceptibles d'amener des souillures par destruction des électrodes.

Au laboratoire, l'effort de recherche a surtout porté sur l'exploitation systématique du caractère de localisation et de bonne définition des températures qui constitue le troisième avantage du chauffage électrique.

La photo 5 montre l'une des premières réalisations de ce genre apparue dès 1938 (triode S. F. R. E 356). L'échauffement des traversées métalliques en kovar qui permet leur soudure sur le verre est assurée par le passage d'un courant basse tension 50 p. [7].

Une forme d'application maintenant bien connue est l'emploi de courants induits échauffant une pièce métallique en contact avec le verre. Le verre est porté de ce fait, très localement, à une température suffisante pour devenir plastique, enrober le métal et permettre le scellement, Ce procédé était connu dès avant-guerre. Il permet la fabrication de soudures verre-métal de petites et grandes dimensions suivant le schéma de la figure 27. Les soudures peuvent être du type figure 28 ou figure 29. Par l'interposition d'une couronne métallique de faible encombrement, on peut également assurer la soudure verre-verre (*fig.* 30).

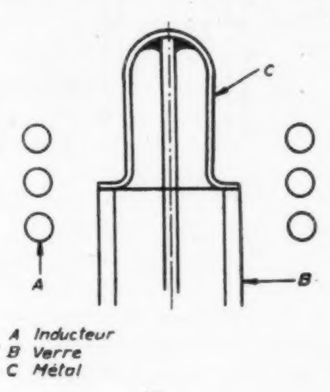
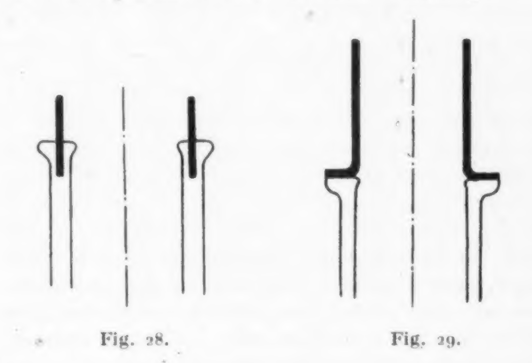


Fig. 27.


Fig. 28. Fig. 29.

La présence à demeure d'une masse de métal dans une région de la lampe où elle n'est pas indispen-

sable au bon fonctionnement n'est pas sans inconvénient. D'autre part le chauffage par induction impose des formes géométriques qui ne peuvent être obtenues qu'avec des métaux usinables qui doivent en outre se souder au verre, et nous avons vu ci-dessus que ces métaux étaient ferromagnétiques, que leur dilatation ne descendait pas au-dessous de celle du molybdène sans abaissement trop considérable de la température du point de Curie, et que celle-ci limite la température de ramollissement du verre. Il y avait donc des raisons multiples à chercher un procédé qui libère de la contrainte de l'utilisation d'un métal soudant.

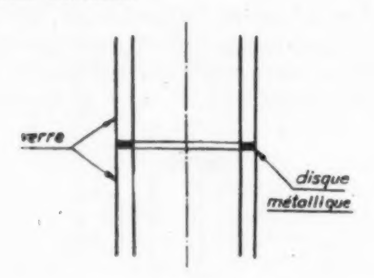


Fig. 30.

Le chauffage par pertes diélectriques dans le verre est une solution. Dans l'état actuel de la technique et pour le problème qui nous préoccupe, ce procédé a l'inconvénient de nécessiter un appareillage compliqué, et il ne permet pas de conduire de bout en bout les opérations au gré de l'utilisateur, des préchauffages étant nécessaires pour amener le verre à des températures où il présente des pertes convenables.

Le mode de façonnage suivant mis au point au laboratoire [8] permet d'opérer avec le minimum de moyens mécaniques et électriques et conduit à la fabrication de tubulures, d'évasements et de soudures verre-verre. Le procédé utilise comme source de chaleur le moule ou l'outil servant au façonnage. Au contraire des procédés habituels qui consistent à porter d'abord la pâte à sa température de travail, puis à la façonner avec des outils moins chauds qu'elle, le moule ou l'outil de travail sont métalliques, et chauffés par des procédés électriques connus, le plus souvent, chaque fois que la forme géométrique le permet, par effet Joule sous basse tension (2 à 8 V). La grosse difficulté est d'éviter le collage du métal sur le verre. On y pare totalement en interposant entre le métal et le verre une fine couche d'un oxyde réfractaire en poudre très divisée. Pendant toute l'opération, il y a contact du verre et de l'outil et non chauffage par rayonnement, ce qui nuirait au rendement thermique et à la localisation de la température. Ces déformations sont imposées au verre par le déplacement de l'outil. Comme la zone de plasticité du verre est étroitement délimitée et comme le mouvement de l'outil peut être commandé avec précision, on conçoit que l'on peut obtenir par ce façonnage une verrerie de cotes rigoureusement déterminées.

La figure 31 montre la fabrication d'évasements de queusots ou de tubes. Le tube est animé d'un

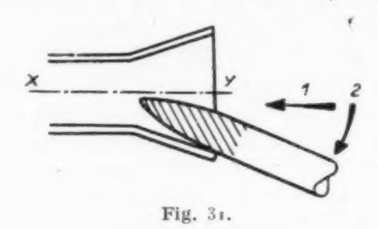


Fig. 31.

mouvement de rotation autour de l'axe XY. L'outil de façonnage est un poinçon de tungstène porté au rouge vif dans la zone hachurée. Il subit d'abord une translation 1, puis un mouvement de rotation 2. L'apport de chaleur est suffisant pour permettre le façonnage, l'oxyde tungstique qui se forme automatiquement dans l'air évite le collage, la surface du verre est nette de toute trace. L'expérience a montré que les outils avaient une usure à peu près nulle.

La figure 32 représente le montage qui permet le percement d'une paroi de verre. La pièce de métal

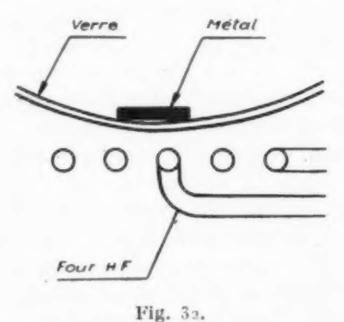


Fig. 32.

est chauffée en H. F., elle ramollit le verre sur lequel elle repose jusqu'au moment où elle le traverse. Les bavures sont enlevées à la meule. On obtient ainsi des perforations à bords extrêmement nets qui peuvent avoir des formes géométriques compliquées. Avec les verres genre Pyrex ou verre T d'épaisseur moyenne 1,5 mm environ, il est inutile

d'opérer en étuve. Si la tenue au choc thermique est moins bonne, ou si l'épaisseur est supérieure à 2 mm, cette précaution devient nécessaire et complique un peu l'appareillage.

La figure 33 est une variante de ce montage pour la fabrication des tubulures. La pièce de métal

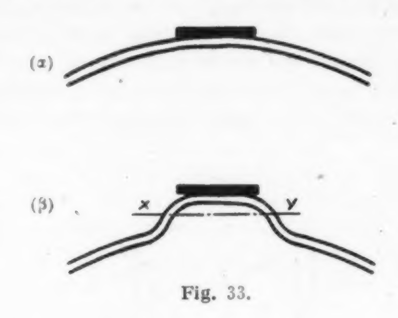


Fig. 33.

produit l'échauffement comme précédemment, mais on souffle lorsque le verre est assez plastique. On obtient la forme β qu'il suffit de couper suivant XY et de meuler pour avoir la tubulure sur laquelle on viendra par exemple souder une traversée métallique.

Les figures 34 et 35 donnent le schéma de soudures verre-verre. L'anneau chauffant repose sur le verre.

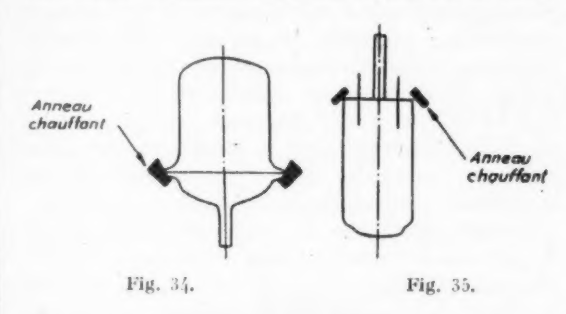


Fig. 34. Fig. 35.

Il est enduit de poudre d'alumine déposée au pistolet à l'aide d'une suspension dans un liant approprié. Ce montage se prête très bien au chauffage de l'anneau par effet Joule.

Une variante (*fig.* 36), dont l'invention est d'ailleurs antérieure au procédé précédent [9], consiste à métalliser la surface du verre de manière à obtenir une couche conductrice que l'on chauffe par H. F. (photo n° 5 *bis*).

c. Procédé de soudure verre-verre utilisant des verres intermédiaires. — Lorsque certaines qualités du verre sont imposées par son emploi dans des conditions déterminées, par exemple l'accord des dilatations dans la soudure verre-métal, et que ces qualités sont difficilement compatibles avec les propriétés physiques que l'on attend de l'isolant pour le bon fonctionnement électrique, une méthode générale permet de tourner la difficulté. Elle consiste à utiliser pour la construction du tube à vide plusieurs verres, en général deux, donc chacun est bien adapté au rôle qu'il doit jouer. On connaît depuis longtemps les verres « d'enrobages » que l'on utilise en fines couches pour la soudure verre-métal et qui constituent un intermédiaire entre le métal et le verre principal.

Nous citerons deux exemples d'applications de ces verres associés qui montrent assez bien la richesse de possibilités de cet artifice.

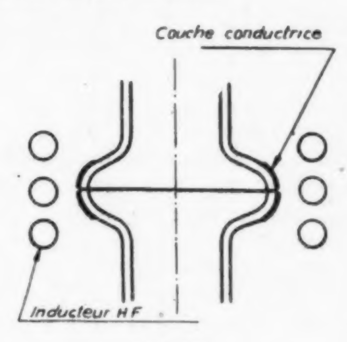


Fig. 36.

Dans l'étude de la soudure verre-métal, nous avons signalé que les seuls métaux présentant de bonnes propriétés métallurgiques et une bonne dilatation étaient à l'heure actuelle des métaux du type fer-nickel-cobalt dont le point de Curie se situe à une température relativement basse (460 à 490°), ce qui impose l'emploi pour la soudure de verres à température de ramollissement également basse, exigence en contradiction avec l'exigence imposée par le bon fonctionnement du tube.

Cet inconvénient disparaît si l'on a soin d'utiliser un verre « intermédiaire » en fine épaisseur, déposé à la surface du métal par enrobage normal ou par vitrification de poudre de verre par un procédé familier à l'émaillage sur métaux. On pourra ensuite souder le verre « principal » sur ce verre sans avoir à se préoccuper de ramollissement, le verre intermédiaire agissant comme couche de glissement lorsque la dilatation du métal et du verre principal sont en désaccord aux hautes températures. Un avantage du procédé est le facile contrôle de la soudure émail-métal que rien ne cache à l'observation avant la soudure au verre principal.

L'emploi d'un verre intermédiaire donne encore une bonne solution au problème de la soudure

verre-verre; lorsque les deux pièces à souder sont faites de verre peu fusible et qu'il y a intérêt à opérer à température aussi basse que possible, on interpose une mince couche d'un verre très fusible entre les deux surfaces à souder. La figure 37 montre

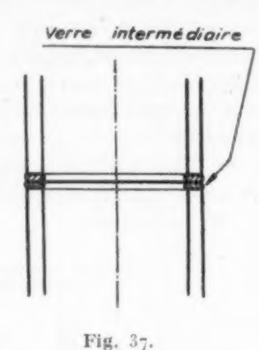


Fig. 37.

l'application à la soudure de deux tubes bout à bout. La fusion du verre intermédiaire assure l'assemblage étanche sans que l'on ait à se préoccuper du ramollissement du verre principal. Au contraire, on pourra avoir intérêt à placer la température de transformation du verre principal au-dessus de la température de soudure de manière à éviter toute trempe du verre principal pendant l'opération. L'absence de déformation, sauf celle de la couche d'émail intermédiaire qui peut être très fine, permet d'atteindre avec des montages mécaniques de guidage convenables une excellente définition des cotes géométriques. De nombreuses applications de ces émaux ont été étudiées ces dernières années en Europe; l'effort du laboratoire a surtout porté sur l'exploitation maximum des conditions très favorables de température de scellement qu'ils permettent dans leurs applications aux problèmes spéciaux posés par la construction des tubes d'émission.

d. Utilisation du poli optique. — On sait que l'on peut atteindre par polissage une haute perfection de la qualité des surfaces, particulièrement si les corps traités sont à l'état vitreux, c'est-à-dire ne présentent pas de direction d'usure préférentielle.

Une série d'expériences menées par le laboratoire [10], dont le détail sera indiqué dans un prochain article de M. Despois, a permis d'aboutir aux conclusions suivantes :

1° Le contact optique des deux surfaces de verre assure un assemblage quasi étanche qui permet d'atteindre le vide limite des meilleures pompes.

2° L'assemblage peut être rendu parfaitement étanche et définitif en portant les pièces en contact à une température déterminée un temps suffisant pour provoquer une véritable soudure par diffusion par un phénomène qui ressemble fortement aux réactions de soudure par contact sous pression de surfaces métalliques polies.

3° Sans provoquer cette réaction solide, on peut encore assurer l'étanchéité par un vernis organique déposé par un moyen quelconque à l'extérieur ou à l'intérieur de l'assemblage, comme représenté figure 38.

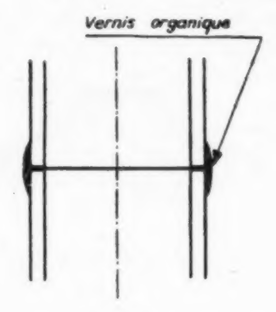


Fig. 38.

Dans tous les cas, on obtient la soudure sans aucune déformation des pièces en contact. Dans le cas 3° on a l'avantage d'un joint démontable. L'expérience montre que, sauf le cas où il y a soudure, il n'est pas nécessaire de respecter d'accords de dilatation entre les deux pièces en contact, la qualité du contact se conservant lorsque, sous l'action du jeu de la dilatation par échauffement ou refroidissement, il y a glissement des pièces l'une sur l'autre. La photo n° 6 montre un joint verre-silice vitreuse avec sa jauge de contrôle, qui a subi deux cycles de montée et descente à 500° et est conservé depuis cinq mois avec un vide constant inférieur à 10^{-6} mm de Hg; on peut voir au niveau de la soudure le vernis organique protecteur étanche déposé seulement pour la conservation, postérieurement aux cycles d'étuvage à 500°.

e. Recuit sous vide. — L'étude des conditions du relâchement des tensions dans le verre a été l'une des premières à laquelle se soit attaqué le laboratoire. Une étude de la recuisson des pièces de verre formant cavités vides de gaz a montré qu'il était techniquement possible de définir des cycles thermiques qui assurent la disparition des efforts internes sans déformations apparentes des pièces, la cavité étant maintenue sous vide pendant tout le cycle thermique de recuit. Sur un plan théorique, cela veut dire qu'il est possible, dans les conditions techniques d'obtention des tempéra-

tures (± 5°) de définir un domaine dans lequel la viscosité du verre permet les déplacements qui assurent la disparition des tensions en étant assez grande pour interdire des déformations sous l'effet de la pression atmosphérique appliquée à l'extérieur de la pièce en traitement. Il va de soi que cette recuisson n'est possible que si l'enveloppe n'est pas trop mince. Cette épaisseur limite est proche de 8/10e de millimètre; elle varie suivant les formes géométriques. Pour les épaisseurs plus faibles, les tensions internes sont d'ailleurs très facilement éliminées par un recuit sommaire.

Le recuit sous vide est spécialement intéressant lorsqu'il est nécessaire de recuire en présence d'organes chimiquement très fragiles contenus dans l'enveloppe et qui ne pourraient supporter sans destruction les températures de recuit en présence de gaz actifs même à l'état de traces.

Quelques exemples d'application à la construction des tubes à vide.

Dans ce paragraphe, nous allons examiner brièvement quelques exemples d'applications pratiques des différents procédés de travail exposés ci-dessus à la construction des tubes à vide.

On a coutume de distinguer deux parties dans l'enveloppe des tubes à vide, le pied qui porte la majorité des traversées métalliques et l'ampoule dont le volume est généralement plus important et qui ne supporte qu'un très petit nombre d'amenées de courant. La dernière opération de la construction appelée fermeture consiste en une soudure étanche du pied sur l'ampoule.

Cette division de l'enveloppe en pied et ampoule est très justifiée dans le cas des lampes classiques de petite puissance fonctionnant en ondes métriques et supérieures, elle est plus discutable lorsqu'il s'agit de lampes de grandes puissances où l'articulation du montage se fait en trois pièces, un anneau métallique formant à la fois sortie grille et support de grille, ou lorsqu'il s'agit de certains tubes pour ondes centimétriques où la distinction de la verrerie en pièces spécialisées est encore plus discutable.

Quoi qu'il en soit, dans la construction des tubes, on a besoin de corps creux pourvus d'un petit nombre de traversées métalliques; pour la clarté de l'exposé nous les appellerons ampoules par opposition aux pieds, pièces munies de traversées multiples et dont le relief général est très proche d'une forme plane.

La fermeture désignera une opération de soudure pratiquée en présence de tout ou partie du montage électronique de la lampe.

Pieds ou ampoules peuvent porter un queusot de pompage.

a. Fabrication des ampoules. — Le procédé de pistonnage permet de faire venir directement de moule les ampoules sous leur forme définitive, avec les tubulures sur lesquelles on soude les traversées métalliques au chalumeau ou de préférence par chauffage H. F.

S'il s'agit de verres intravaillables au chalumeau et de prototypes pour lesquels il serait peu pratique d'utiliser des moules de verrerie, on peut faire venir des tubulures par le procédé de façonnage par chauffage électrique décrit page 59.

b. Fabrication des pieds. — La présence des traversées de courant nombreuses et rapprochées, avec dans certains cas de grandes différences de potentiel entre électrodes, pose des problèmes spéciaux de réalisation. Notons les idées directrices suivantes dans l'ordre d'importance décroissante :

— Grande sécurité d'utilisation : on doit être sûr, avec un pourcentage de déchets extrêmement réduit, que le pied est étanche, robuste aux chocs mécaniques (brochage) et thermique (fermeture), non susceptible de fêlures subites, c'est-à-dire dépourvu de tensions internes.

— Formes géométriques adaptées à l'emploi de la lampe (connexions de longueur minimum, répartition des traversées métalliques optimum en vue de capacités interélectrodes, de fuites et de pertes les plus faibles possibles).

— Bonnes qualités du verre (pertes, électrolyse, ramollissement).

— Excellent positionnement mécanique des traversées support d'électrodes rigides pour réduire au minimum l'emploi de guides isolants à l'intérieur du montage, grande précision du brochage.

— Les compromis étant naturellement fixés par le prix de revient.

Dans le domaine des pieds de petits diamètres, le laboratoire a étudié la fabrication sur machine de pieds plats par pressage (*cf.* troisième partie). La photo n° 7 montre un pied ancien et un pied moderne destinés à des lampes de puissance analogue. Le gain en encombrement, en diminution de longueur des connexions, en augmentation des lignes de fuite est évident.

La photo n° 8 donne l'exemple d'une réalisation de pied de plus grand modèle. Sur la coupelle en verre E obtenue par pistonnage avec ses tubulures ouvertes par meulage, on est venu souder par chauffage H. F. les traversées métalliques en

Dilver P. Ces traversées présentent une grande surface d'enrobage pour limiter le plus possible l'échauffement au niveau de la soudure verre-métal pendant le fonctionnement. Le Dilver P subit un enrobage préalable superficiel en verre L, ce qui facilite le contrôle d'étanchéité par examen de la surface du métal avant soudure sur la coupelle et permettrait d'opérer avec un verre principal à température de ramollissement beaucoup plus élevée que celle du verre E. La figure 39 montre à la fois la simplicité de l'appareillage de soudure

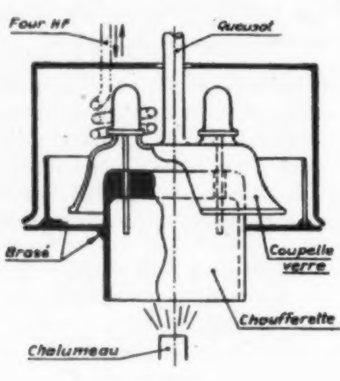


Fig. 39.

du métal sur la coupelle et la façon dont est assurée la précision géométrique de positionnement des organes métalliques. L'opération est menée sans qu'il y ait à aucun moment déformation du verre de la coupelle. La figure 40 donne les conditions d'essai de solidité de la soudure verre-métal; on

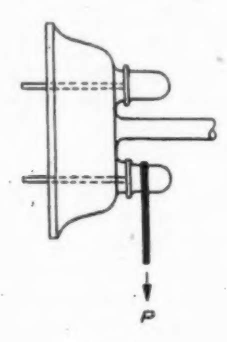


Fig. 40.

obtient la cassure de la coupelle et non la rupture de l'enrobage vers $P = 65$ kg.

Il est également possible d'utiliser le poli optique pour fabriquer des pieds sans aucune déformation des assemblages.

c. *Fermeture*. — Telle que nous l'avons définie, la fermeture est un assemblage formant joint étanche réunissant deux pièces de l'enveloppe et pratiquée en présence de tout ou partie du montage électronique. Or, ces montages contiennent des organes facilement susceptibles de détériorations chimiques lorsqu'on les chauffe en présence d'air ou de gaz réputés neutres mais toujours chargés d'impuretés. Parmi ces organes fragiles figurent les cathodes à oxydes et les plaques zirconiées.

Dans la pratique courante, la fermeture est obtenue par soudure fondue verre-verre ou par soudure verre-métal. Pour protéger le montage, on doit opérer une chauffe très locale qui permette de porter le verre à sa température de fusion pâteuse sans élever excessivement la température de l'organe fragile que l'on gagnera à éloigner le plus possible de la zone de soudure. Il faut également opérer rapidement, ce qui conduit à escamoter en quelque sorte le recuit et, par suite, impose l'emploi de verres relâchant facilement leurs tensions.

Avec les anciennes lampes, on réussissait la fermeture avec de bons rendements, mais la diminution considérable d'encombrement des lampes modernes en rapprochant l'organe fragile de la zone de soudure et en imposant des verres peu fusibles a accru toutes les difficultés du problème.

Le laboratoire a étudié dans le détail plusieurs procédés de fermeture qui permettent d'opérer avec les verres les moins fusibles sans que l'on ait à s'inquiéter de la proximité des pièces altérables chimiquement.

On a tout d'abord montré que l'altération chimique des plaques zirconiées (fabriquées dans des conditions déterminées une fois pour toutes) était un phénomène plus sensible que l'altération des cathodes à oxyde, c'est-à-dire que la destruction de ces dernières n'avait pas lieu si pendant l'opération de soudure un fragment de molybdène zirconié mis à leur place restait inaltéré. Il a donc été possible de choisir un test [11] pour contrôler la valeur d'un procédé de soudure. Une étude précise des conditions d'évolution du molybdène zirconié a montré que l'altération commençait dans l'air vers 310° et sous gaz protecteur sommairement épuré vers 400°, sans que la nature du gaz protecteur intervienne; ce peut être de l'argon, de l'hydrogène ou de l'azote, de préférence ce dernier pour des raisons de sécurité et d'économie. Une épuration poussée des gaz est pratiquement inutile, car elle conduit à un gain négligeable sur les températures d'altération, les impuretés ne pouvant être éliminées que partiellement dans les conditions techniques d'utilisation.

Si l'on opère sous vide, la protection ne peut être obtenue qu'avec des pressions extrêmement réduites, de l'ordre de celles qui règnent à l'intérieur des tubes à vide.

Une première solution consiste à opérer une soudure très rapide, puis à recuire sous vide. La machine photo n° 9, étudiée et construite par nous, assure des cadences de 1 lampe/minute avec chauffage très localisé. Elle est prévue pour la fermeture d'un grand nombre de modèles de petites lampes. La photo n° 10 montre la machine à recuire sous vide qui y est associée.

On peut également opérer la soudure par chauffage électrique très local décrit page 59, puis recuire sous vide.

Une solution différente utilise un verre intermédiaire très fusible dont le point de soudure extrêmement bas permet de préserver le montage des très petites lampes. La photo n° 11 montre une réalisation de machine également étudiée et construite par nous, qui permet la fermeture de très petites lampes en cristal. Sur cette machine, tous les artifices de chauffage électrique localisé et de moindre échauffement de l'intérieur de la lampe ont été cumulés.

Mais la solution à notre sens la plus élégante proposée par le laboratoire consiste dans l'utilisation des propriétés indiquées page 60 du joint par poli optique, soit que l'on adopte la soudure définitive à l'aide d'un traitement thermique approprié, soit que l'on pratique l'étuvage à une température inférieure à la température de collage, ce qui est d'autant plus facile que le point de ramollissement du verre est plus élevé. On assure dans ce second cas la conservation de l'étanchéité par l'application d'un vernis une fois la lampe terminée.

Le joint est obtenu à froid, l'altération des organes fragiles est totalement exclue puisque le chauffage n'a lieu à tout moment qu'après obtention du vide limite des pompes. La déformation des pièces est nulle.

Conclusion.

Les problèmes posés à la verrerie par le fonctionnement des tubes à vide et leur facile construction nous ont amenés à poursuivre une série de recherches sur les compositions chimiques, les propriétés physiques des verres et les procédés de façonnage.

Les verres nouveaux présentent un ensemble de propriétés qui permettent de satisfaire pratiquement toutes les exigences de qualité posées par la technique dans son état actuel. Ces verres ont été conçus avec le souci constant de pouvoir être exploités avec le minimum de changement dans les méthodes de travail et de l'appareillage; en particulier ils se prêtent d'une manière très satisfaisante au travail au chalumeau sous la seule condition d'éviter des flammes trop réductrices, ils sont fondus et recuits à l'aide d'installations industrielles prévues pour la fabrication du cristal de luxe à haute dilatation. Le compromis de qualité qui a participé à leur élaboration a été dirigé dans le sens de l'obtention de l'ensemble des propriétés définies page 48, combiné au désir de facile exploitation dans les conditions actuelles où toute mise en œuvre de réalisations présentant un caractère de nouveauté se heurte à de gros obstacles matériels.

Les procédés de travail nouveaux proposés par le laboratoire et poussés pour la plupart jusque dans leurs détails d'application pratique ont permis de faire des progrès importants en ce qui concerne la rapidité et la facilité de fabrication, ainsi que la précision des cotes géométriques, tout en diminuant substantiellement l'effort et les performances à exiger de la main-d'œuvre. Ces procédés permettent de construire des tubes à vide avec une large originalité de conception quant à la disposition géométrique des organes soutenus par le verre.

Plusieurs solutions ont été étudiées pour résoudre le difficile problème de la fermeture des tubes à vide avec une protection totale des pièces chimiquement altérables et une déformation très faible ou même nulle de la verrerie dans la zone de soudure.

Une caractéristique très favorable des procédés nouveaux de travail est la possibilité qu'ils offrent de façonner des verres très dévitrifiables, réputés jusqu'ici inutilisables. Associé à l'emploi de verres intermédiaires, cet avantage permet d'envisager l'emploi de verres principaux dont certaines qualités, en particulier électriques, pourront surclasser celles de tous les verres actuels. Dans l'élaboration de ces verres on pourra en effet ne tenir aucun compte des conditions *c*, *d*, *e*, *f*, *k* de la page 48. L'expérience de la technique d'essais de compositions vitrifiables et la connaissance des fonctions empiriques reliant avec une bonne approximation les propriétés physiques des verres à leur composition chimique qui résulte de l'étude des verres du type E et T, aidera largement le laboratoire à aboutir rapidement dans cette voie.

Avec le joint par poli optique, on peut envisager l'emploi pour certaines parties de l'enveloppe des tubes à vide ou pour certains organes de fonctionnement de silice vitreuse dont les propriétés physiques sont d'un intérêt exceptionnel ($\text{tg}\,\delta = 1.10^{-4}$,

$\alpha = 5{,}8.10^{-7}$, ramollissement vers 1 700°, transparence à l'ultraviolet, etc.).

L'ensemble des résultats acquis ne peut nous faire oublier l'immense domaine des recherches encore inabordées. Étudiant les questions avant tout sous l'aspect de la qualité, l'équipe du laboratoire a cherché à définir puis à résoudre d'une manière suffisante pour l'immédiat les problèmes posés par le constructeur de tubes au verrier. Chemin faisant, certains résultats ont engendré l'espoir de possibilités plus larges que celles qui étaient attachées au problème à son origine.

Un tube à vide doit être avant tout considéré comme générateur de phénomènes électroniques. Nous serons heureux si nous avons pu étendre le domaine des libertés de conception laissées au constructeur en diminuant certaines contraintes imposées jusqu'ici par le verre, et si nous avons pu, par un effort de compréhension scientifique des phénomènes, affaiblir la réputation faite au verre d'être l'éternel gêneur, le réservoir à surprises incompréhensibles.

TROISIÈME PARTIE.

ÉTUDE D'UN PROCÉDÉ PRATIQUE POUR LA FABRICATION EN SÉRIE DE PIEDS DE LAMPES MOULÉS A LA PRESSE.

Le but poursuivi a été la réalisation de pieds de forme rationnelle présentant, en plus de l'étanchéité imposée, les caractéristiques suivantes :

1° Encombrement aussi réduit que possible permettant de réduire celui de la lampe terminée;

2° Utilisation facile : fermeture simple et montage pratique des différents éléments de la lampe;

3° Dimensions précises et constantes;

4° Suppression dans certains cas du culottage de la lampe : lampe à brochage direct.

Nous avons également recherché une matière première à bas prix de revient et des machines de fabrication standard aussi simples que possible éliminant toute main-d'œuvre spécialisée.

Le pied terminé se présente comme un disque de verre, muni en général d'un queusot et traversé par un certain nombre de « passages » métalliques de nature différente suivant le verre employé et l'utilisation proposée.

Le procédé de fabrication le plus indiqué est alors le pressage, opération qui se fait dans un moule. Celui-ci comprend une matrice, contenant les passages et éventuellement le queusot, sur laquelle on amène le verre d'apport. Lorsque celui-ci a atteint la viscosité désirée, un poinçon descend sur cette matrice et y comprime le verre sous la forme voulue. Enfin le poinçon remonte et le verre étant redevenu solide, un éjecteur soulève le pied qui est ensuite extrait du moule, pour recuisson.

Plusieurs solutions sont possibles quant à la méthode d'apport de verre. Les principales sont les suivantes :

a. Verre en poudre : cette solution a été écartée *a priori*, les utilisateurs ne voulant pas entendre parler de pieds non transparents.

b. Verre fondu fluide : cette solution, sans doute capable de très gros débits à bas prix de revient, nécessite la mise en œuvre d'un outillage compliqué. Elle est encore dans le domaine des recherches du laboratoire.

c. Verre sous forme de pièces d'apport spécialement préparées : c'est la solution qui a été adoptée.

Les grandes lignes du problème étant ainsi posées, nous nous proposons d'examiner en détail l'étude réalisée.

La fabrication à la presse de pieds pour lampes en verre présente trois difficultés sérieuses :

1° Le dosage précis de l'apport de verre pour l'obtention de pièces de formes et dimensions constantes;

2° L'étanchéité des soudures verre-métal pour les traversées métalliques;

3° Les calcinures.

Dosage de l'apport de verre.

Si l'on compare cette fabrication de pieds à la presse avec le procédé pratiqué en verrerie pour le moulage de certaines pièces, on s'aperçoit rapidement qu'il est pratiquement très difficile de doser avec précision l'apport de verre en fusion sans avoir recours à une machine spéciale, relativement compliquée, pourvue d'un système de distribution automatique.

En verrerie on évite l'emploi d'une telle machine en réservant dans le poinçon P, en dehors du volume exact de la pièce, un ou plusieurs volumes annexes H dans lesquels l'excès de verre V peut se loger librement. La figure 41 montre l'application de ce procédé au moulage d'un disque. La pièce brute de moule présente alors une ou plusieurs masselottes de verre H 1 que l'on fait ensuite disparaître par meulage. Or, dans le cas qui nous intéresse, on ne

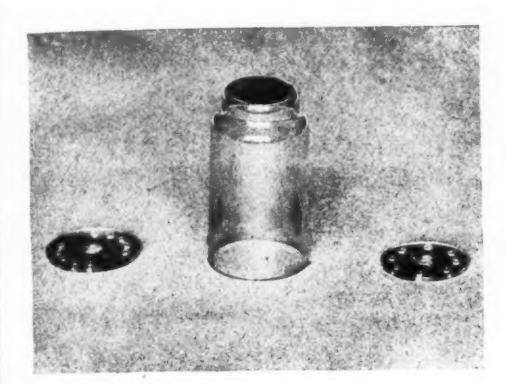


Photo 1.

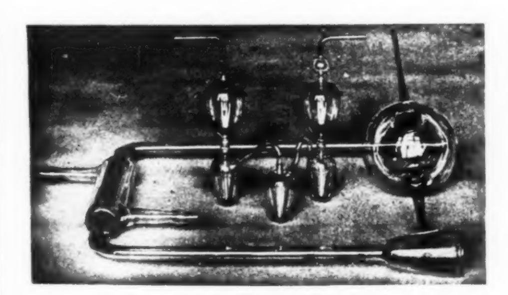


Photo 2.



Photo 2 *bis*.

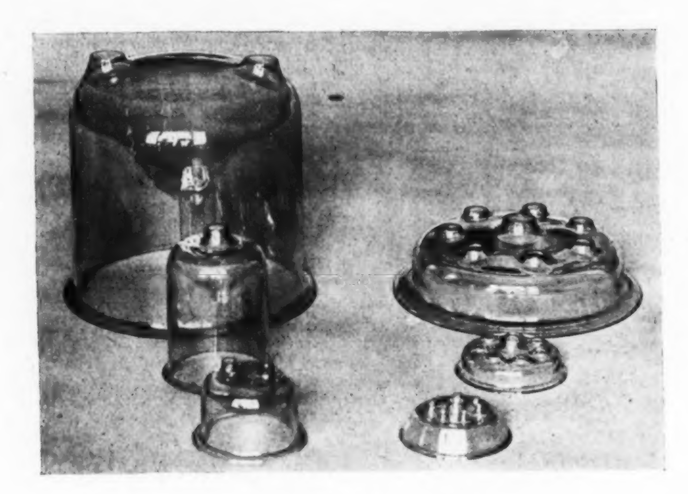


Photo 3.

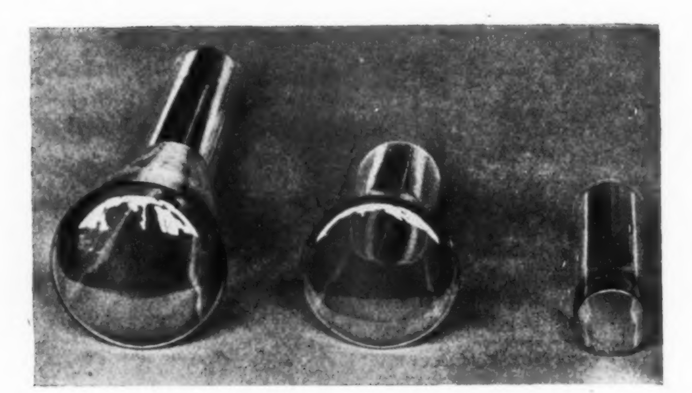


Photo 4.

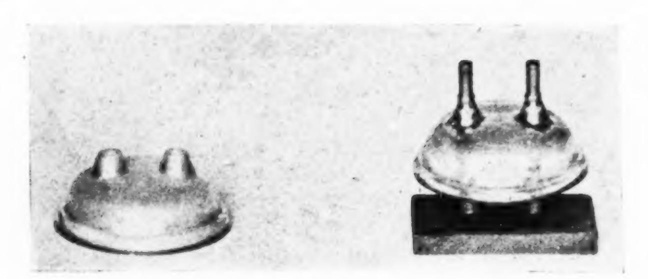


Photo 5.



Photo 5 *bis*.

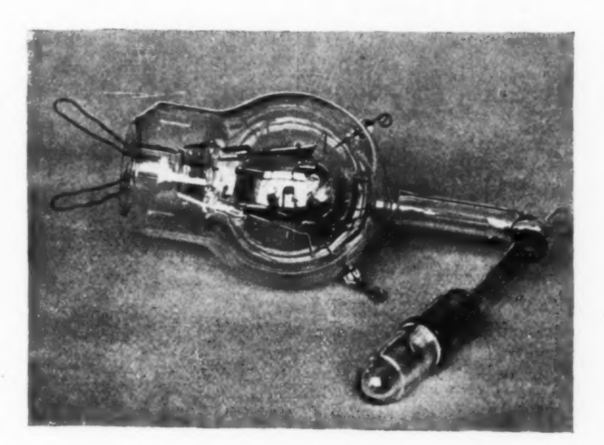


Photo 6.

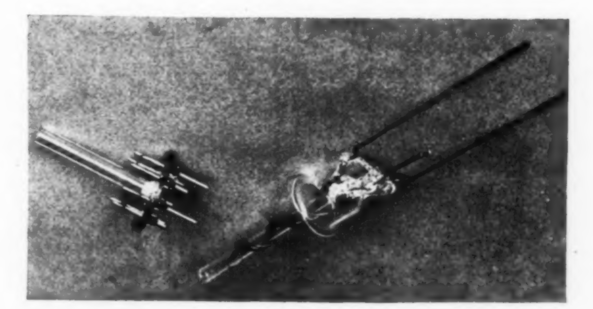


Photo 7.

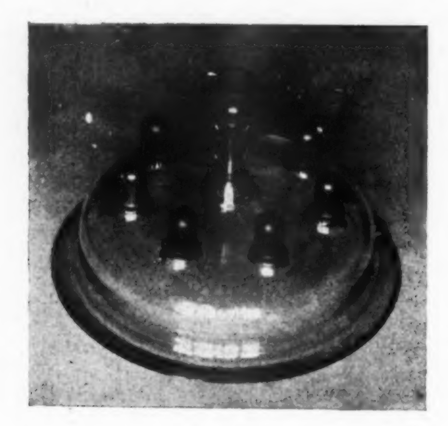


Photo 8.

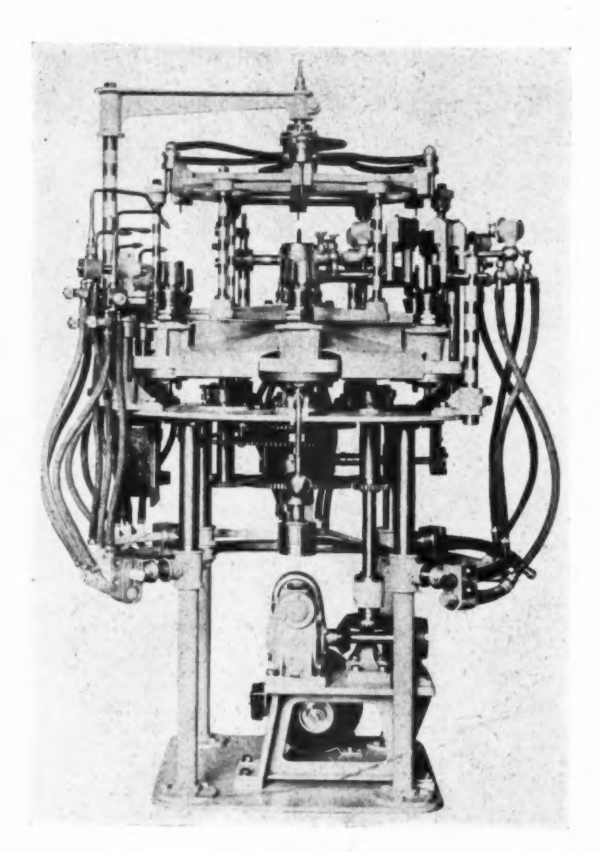


Photo 9.

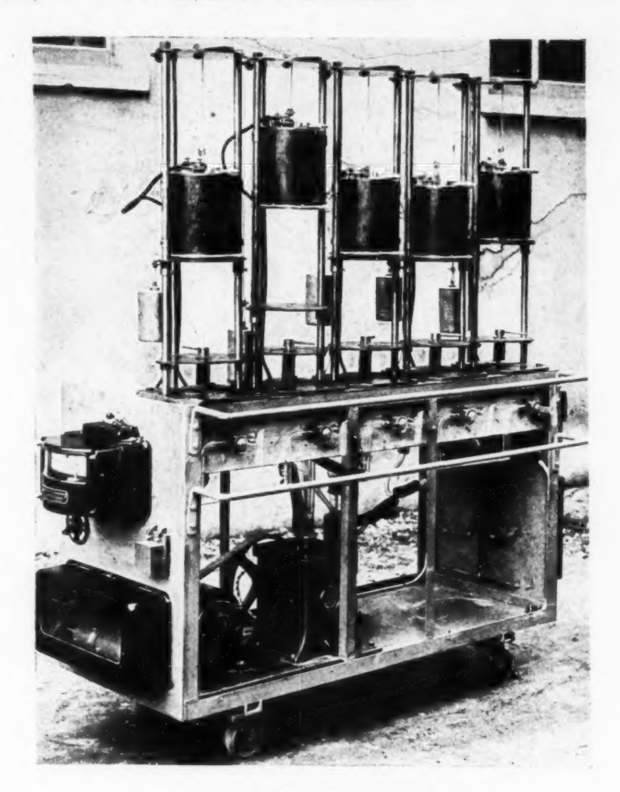


Photo 10.

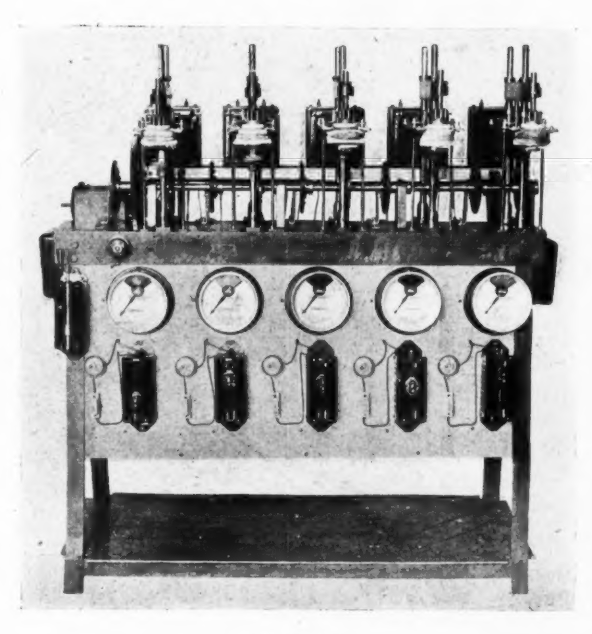


Photo 11.

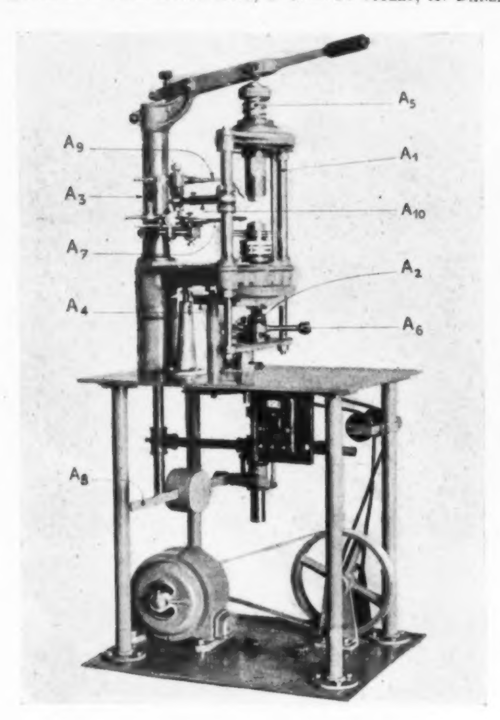


Photo 12.

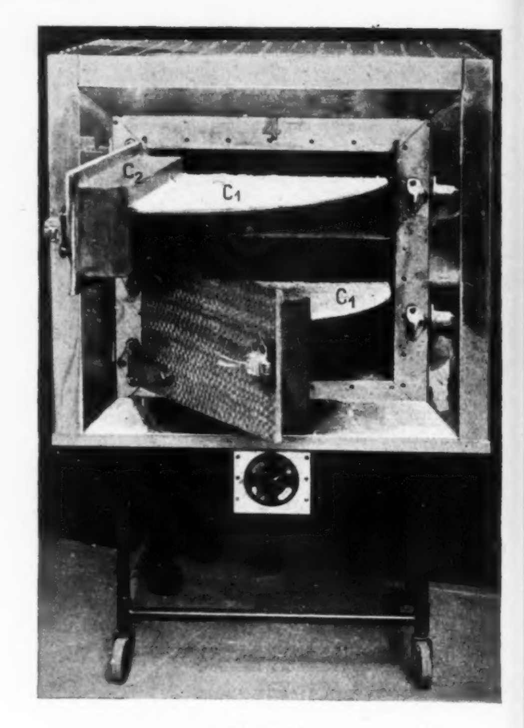
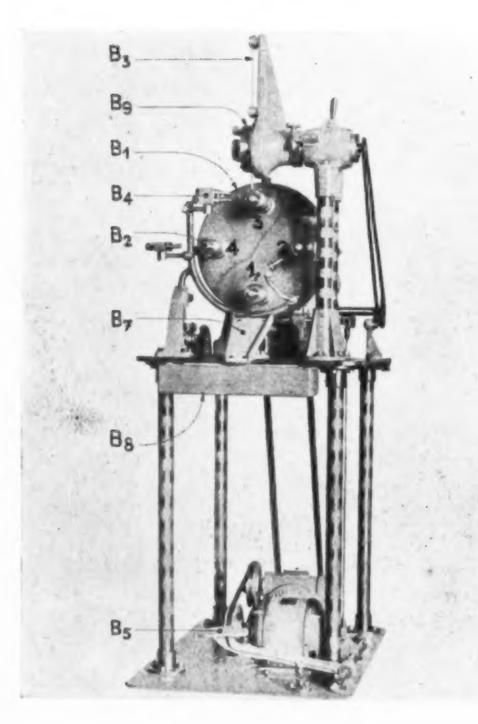
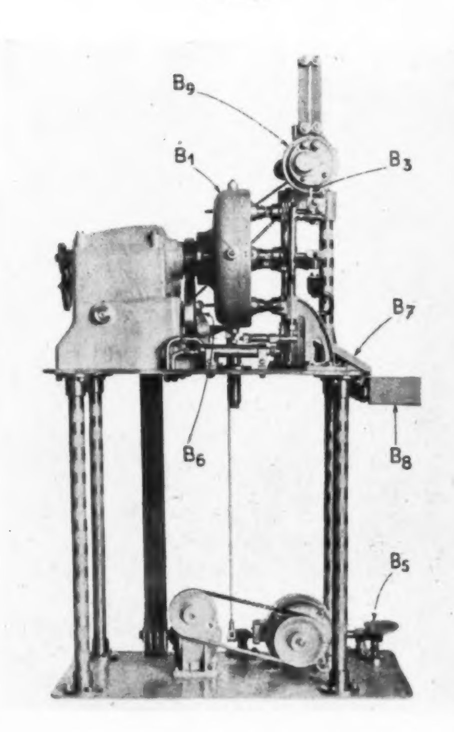


Photo 14.





Photos 13.

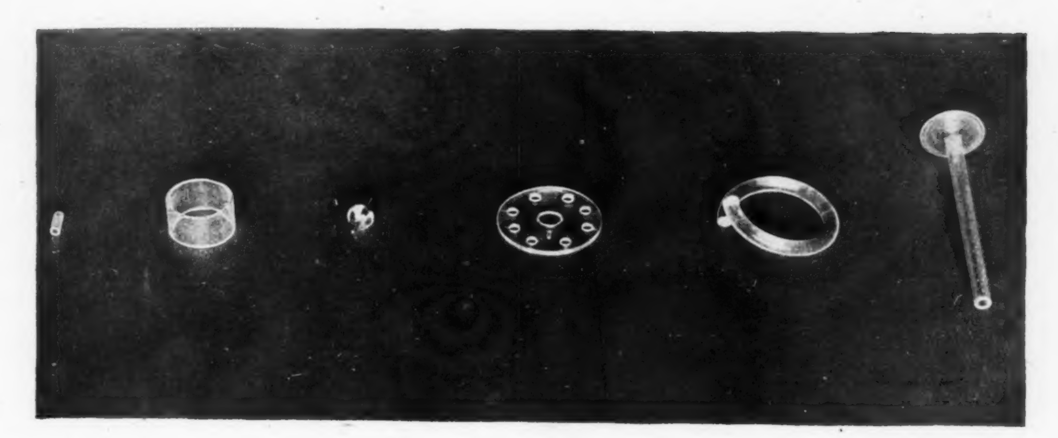


Photo 15.

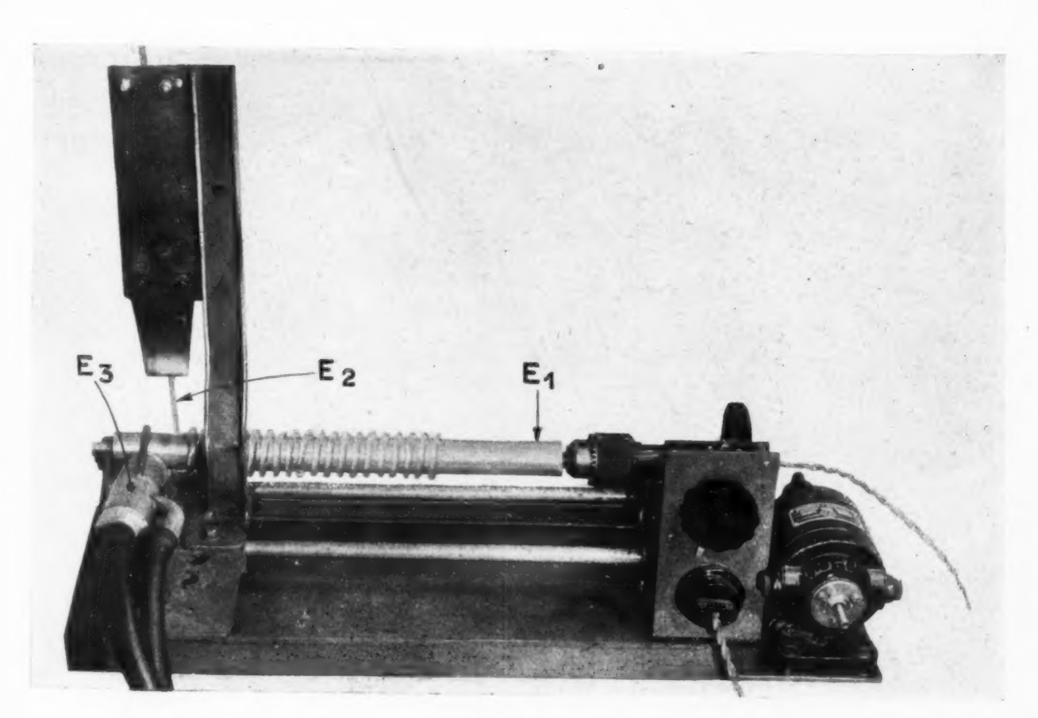


Photo 16.

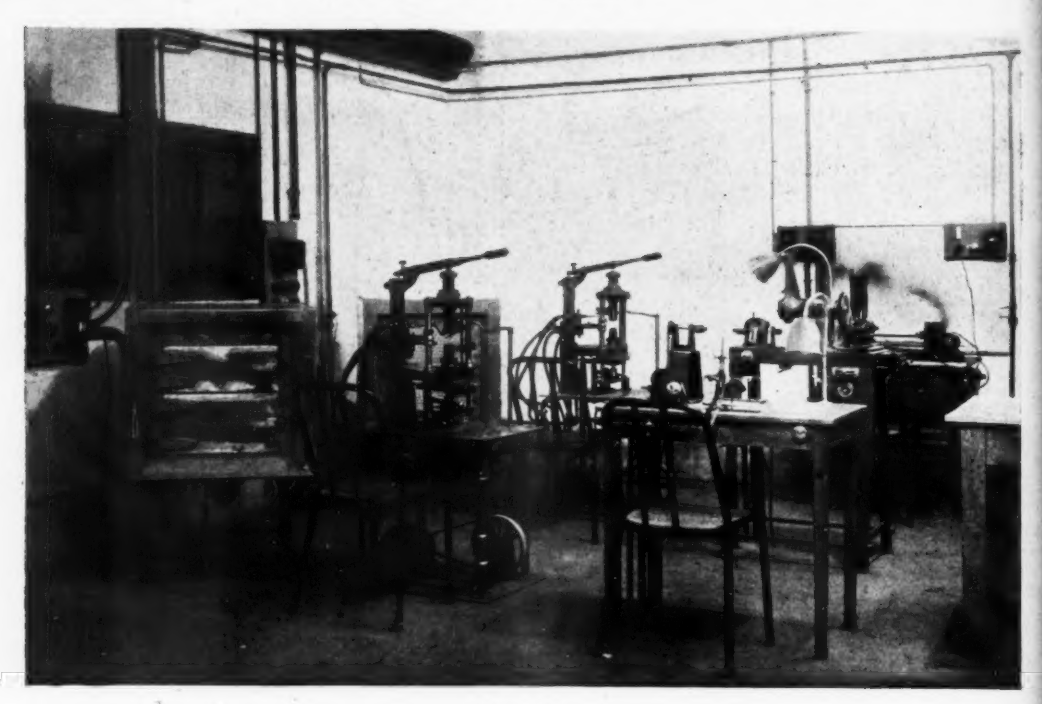


Photo 17.

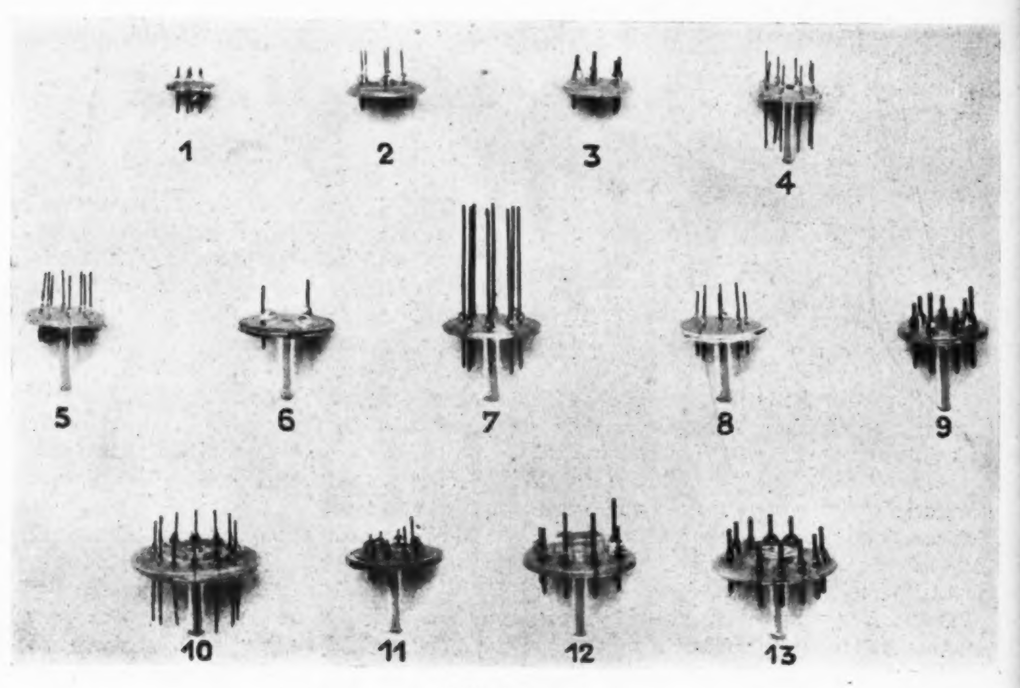
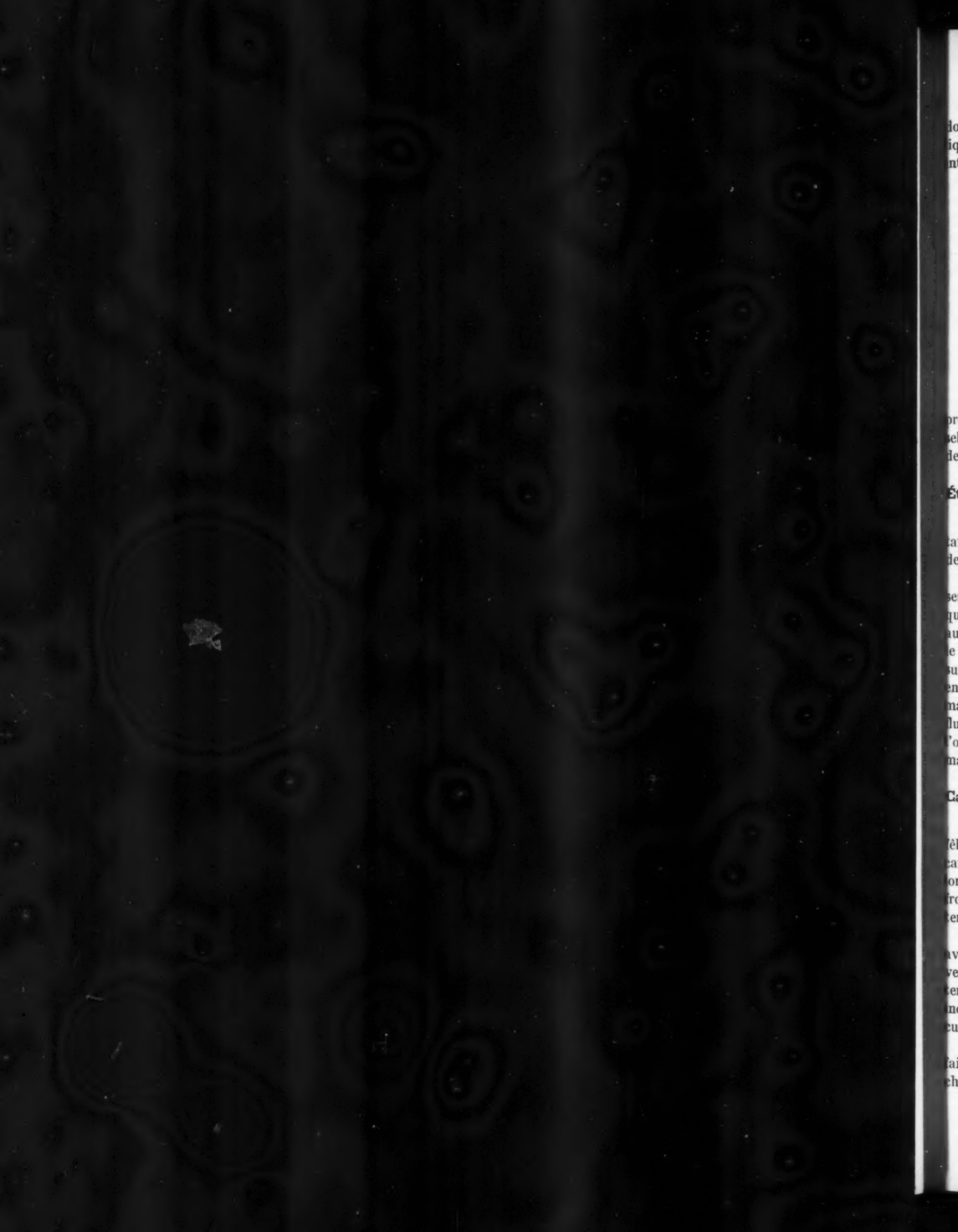


Photo 18.





loit pas oublier la présence de traversées métalliques et parfois même d'un queusot ou de bossages nterdisant toute opération de meulage après

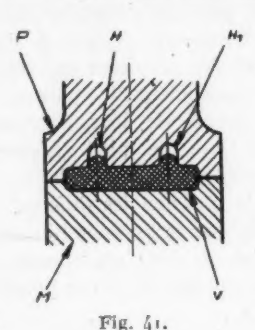


Fig. 41.

ressage. D'autre part cette opération augmente, elon la précision désirée, assez sensiblement le prix le revient du produit fini.

Étanchéité des soudures verre-métal.

On sait en effet que cette question est très importante et qu'elle conditionne l'utilisation d'un pied le lampe.

Les passages d'un pied ne doivent donc pas être eulement maintenus par le verre; il faut encore que leur soudure avec celui-ci forme un joint étanche ux gaz, et cette étanchéité n'est obtenue que par e mouillage du métal par le verre en fusion. Il ne uffit donc pas que le verre soit simplement mis n contact avec le métal au moment du pressage, nais bien auparavant, alors qu'il est encore très luide, et ceci pendant un temps suffisant pour que 'oxyde qui recouvre le métal se dissolve d'une nanière satisfaisante dans le verre.

Calcinures.

En langage verrier les « calcinures » sont des êlures très superficielles qui sont propres aux fabrications pressées en verrerie. Elles apparaissent orsque le verre est pressé trop fortement, ou trop roid, ou bien encore lorsque celui-ci est trop longemps en contact avec le métal froid.

Les calcinures sont graves car elles se développent vec le temps sous l'effet des forces internes du verre imparfaitement recuit, ou des variations de empérature; c'est d'ailleurs à leur présence presque ndécelable que l'on doit imputer la fragilité particulière des pièces en verre pressé.

Pour éliminer ce défaut d'une manière satisfaisante, il faut presser le verre alors qu'il est très chauffé, soit en le laissant un temps extrêmement court au contact du moule, soit en opérant plus lentement, mais dans un moule porté à une température supérieure au point de ramollissement du verre.

Le procédé exposé tourne ces difficultés :

— La première, en amenant le verre non pas par coulée d'une pâte en fusion, mais par des pièces d'apport préparées mécaniquement et par conséquent de formes et dimensions bien déterminées, que l'on charge à froid ou préchauffées, selon les cas, sur la matrice et dont on provoque la fusion à l'aide de chalumeaux. L'apport de verre se trouve ainsi dosé avec une assez grande précision et de plus grossièrement réparti en épaisseur sur la matrice.

— La deuxième difficulté est évitée par un chauffage énergique du verre à l'endroit des traversées métalliques ou par l'enrobage préalable des passages, selon les cas, comme nous le verrons plus loin.

— Enfin, le troisième inconvénient est écarté en pressant le verre pendant un temps très court sur une matrice possédant une température assez élevée, le pied restant au contact de cette dernière après pressage. On voit donc que la température de la matrice doit être comprise entre deux limites bien déterminées, ni trop chaude pour éviter le collage du pied sur cette matrice, ni trop froide pour éviter les calcinures. L'intervalle de températures est cependant assez large pour qu'il soit facile de doser le refroidissement de la matrice en faisant varier l'épaisseur des parois de celle-ci ou bien en utilisant un radiateur.

I. — Machine de fabrication.

Description.

Lorsque cette étude a été entreprise, le but était de réaliser un type de pied illustré par la figure 42 en verre tendre passages copper-clad.

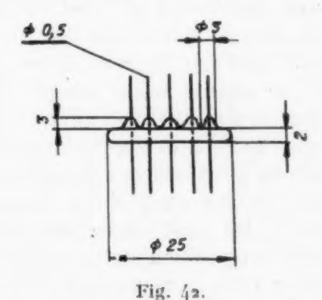


Fig. 42.

Le laboratoire a alors étudié et réalisé une machine illustrée par la photo 12.

Les principaux organes composant cette machine, que l'on peut comparer à une petite presse à levier et que nous décrirons rapidement, sont :

1° Un bâti support de moule;
2° Un dispositif d'éjection du pied terminé;
3° Un dispositif de chauffage pour fusion des pièces d'apport;
4° Le moule.

1° *Bâti.* — Le bâti de presse proprement dit, c'est-à-dire la partie A_1 supportant l'ensemble du moule et, à sa partie inférieure, le système d'éjection A_2, peut occuper deux positions différentes, comme dans certaines machines du type Racine, par une simple rotation de celui-ci autour de la colonne A_3 supportant le levier de pression. Ces positions nettement déterminées par encliquetage et butée sont :

— Position de chargement servant également à l'éjection de la pièce finie;
— Position de travail ou fabrication du pied.

A cette dernière position l'ensemble du moule est animé d'un mouvement de rotation autour de son axe vertical par l'intermédiaire d'un embrayage A_4. Le coulisseau support de poinçon se trouve alors placé exactement sous le levier de pressage, lequel, au moment de l'opération, abaisse le poinçon qui est ensuite ramené rapidement à sa position primitive par l'intermédiaire d'un ressort A_5. L'opération de pressage s'effectue donc en position tournante.

2° *Dispositif d'éjection.* — L'éjection du pied terminé se fait par l'intermédiaire d'un levier A_6 actionnant une came à rampe verticale pourvue d'une butée à billes sur laquelle repose l'éjecteur coulissant à l'intérieur de la matrice. Cet éjecteur, tubulaire dans le cas d'un pied à queusot, est muni à sa partie supérieure de petits pistons supportant les traversées métalliques du pied à l'intérieur de la matrice et qui, au moment de l'éjection, chassent le pied vers le haut par l'intermédiaire des passages jusqu'à ce que ceux-ci soient complètement sortis de leurs logements. On voit que l'éjection est totale et que l'effort exercé uniquement sur les passages est très progressif et uniformément réparti. Cette éjection se fait en position fixe, c'est-à-dire non tournante. On peut cependant avoir recours à ce dispositif en position de travail lorsque dans certains cas on est amené pour la fabrication d'un pied à chauffer celui-ci en position haute, mais non totalement éjecté. C'est la raison pour laquelle cet éjecteur est monté sur butée à billes.

3° *Chauffage.* — Le dispositif de chauffage prévu sur cette machine se compose de trois chalumeaux oxy-gaz.

Comme on peut le constater sur la photo 12, deux de ces chalumeaux A_7 sont horizontaux. Ceux-ci, montés sur des glissières individuelles, peuvent se déplacer parallèlement, permettant ainsi un réglage très précis de leur écartement, variable avec chaque type de pied. L'ensemble de ces chalumeaux est également réglable par rapport à l'axe du moule et selon les différentes hauteurs de matrice. Ce réglage se fait par l'intermédiaire d'une glissière coulissant dans un manneton solidaire, à l'intérieur de la colonne A_3, d'une potence commandée par le levier A_8.

Le troisième chalumeau A_9, dit « piqueur » parce qu'il possède une lance inclinée sur la surface de la matrice, est monté dans une chape orientable et réglable fixée à l'extrémité d'un bras télescopique A_{10} pivotant autour d'une des colonnes du bâti de presse. Cette rotation permet d'éclipser rapidement ce chalumeau lorsqu'on amène le bâti en position fixe.

4° *Moule.* — Les moules (*fig.* 43) utilisés pour la fabrication de ces pièces se composent de trois

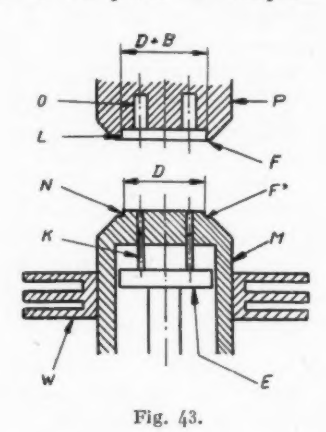


Fig. 43.

parties : poinçon, matrice, éjecteur; la matrice pouvant être, selon les cas, pourvue d'un radiateur à ailettes W.

Les deux premières parties, poinçon et matrice, reproduisant en creux et relief la forme de la pièce que l'on désire obtenir, on comprendra que chaque type de pied impose un moule spécial.

La nature du métal employé à la fabrication de ces moules a une certaine importance, celui-ci ne devant en aucun cas coller au verre en fusion, ce qui rendrait toute opération d'éjection impossible.

Le métal qui a été adopté est le laiton. Cet alliage, peu coûteux et d'un usinage facile, présente une particularité intéressante aux températures assez élevées auxquelles il est porté pendant la fabrication d'un pied. En effet, de par sa composition, ce métal dégage sur les surfaces chauffées des composés pulvérulents (zinc, oxyde de zinc, etc.) particulièrement favorables, évitant tout collage du verre et éliminant ainsi l'emploi d'enduits protecteurs (craie, graphite, vernis, etc.) très souvent utilisés en verrerie. L'expérience a également montré qu'à ces mêmes températures cet alliage conserve encore des propriétés mécaniques suffisantes pour permettre l'emploi de tels moules dans des fabrications de petites séries.

Un autre point important concernant la fabrication de ces moules est la régularité des formes géométriques de la pièce moulée que l'on désire obtenir, et en particulier l'épaisseur et le découpage très net du bord extérieur pour permettre la facile soudure du pied sur l'ampoule au moment de la fermeture de la lampe. Ce résultat a été obtenu en utilisant un moule de forme spéciale (*fig.* 43). La partie supérieure du moule ou poinçon P est pourvue d'un manchon L dans lequel s'encastre exactement la partie N de la mâchoire inférieure du moule ou matrice M. En fin de course, les faces F et F′ viennent en contact, déterminant ainsi avec une très grande précision l'épaisseur du pied. On voit d'autre part que le verre qui est alors comprimé dans un moule clos est maintenu prisonnier par le manchon L et que le faible excédent de verre ne peut être chassé que par les trous O du poinçon à l'endroit des enrobages. Contrairement à ce que l'on pourrait supposer, la forme et la hauteur de ceux-ci n'en sont pas moins constantes à très peu de chose près, ceci étant donné la méthode d'apport de verre employée.

En ce qui concerne l'encastrement du poinçon et de la matrice, il y a lieu de signaler qu'en raison de la position des chalumeaux chauffant les pièces d'apport posées sur la matrice, cette dernière est portée à une température plus élevée que le poinçon. Or, nous avons vu dans le problème des calcinures qu'une certaine température est indispensable. On remédie à cet inconvénient pour le bon fonctionnement du moule en laissant entre les parties s'emboîtant L et N un léger jeu de dilatation β calculé en fonction de la différence de ces températures.

On comprendra également que l'on doit tenir compte de cette dilatation pour le diamètre extérieur du pied et le diamètre de brochage de celui-ci dans le cas d'une lampe à brochage direct, c'est-à-dire sans culot. On sait en effet que dans ce domaine, les tolérances sont en général assez étroites. Il faudra donc que les trous prévus sur la matrice et destinés au logement des passages métalliques du pied soient percés en fonction de cette dilatation.

Nous ne croyons pas avoir à revenir sur la question de l'éjecteur E. Nous pensons en avoir suffisamment parlé dans la description de la machine. A noter toutefois que cette pièce fait partie du moule, puisqu'elle supporte, comme nous l'avons vu, les passages du pied et que, de ce fait, la position des pistons K doit correspondre exactement au perçage de la matrice. D'autre part, c'est cet éjecteur qui détermine la hauteur des passages sous le pied, c'est-à-dire dans certains cas des broches de la lampe.

Fonctionnement.

Connaissant maintenant les principaux organes de cette machine, il est facile d'en comprendre le fonctionnement et le processus de fabrication d'un pied qui, malgré les différents types, reste sensiblement le même, peut se résumer ainsi :

Après avoir introduit les passages métalliques dans la matrice, ceux-ci étant ainsi rigoureusement positionnés, on charge, sur cette même partie, les différentes pièces d'apport de verre. Cette opération terminée en position 1, on amène le bâti en position 2, où l'ensemble du chargement (verre et passages) alors en rotation se trouve uniformément chauffé par les flammes très ténues et localisées des chalumeaux (horizontaux et piqueur). Lorsque la température de déformation visqueuse est atteinte, on abaisse rapidement le poinçon qui vient presser le verre sur la matrice. On ramène ensuite le bâti en position 1 où le pied est éjecté pour être recuit.

II. — Pièces d'apport de verrerie.

Étant donné les différents verres et métaux spéciaux imposés par la fabrication des lampes de T. S. F., il y a lieu, dans le domaine des pièces d'apport, de considérer :

— Le degré d'oxydation des métaux employés pour l'obtention de joints étanches, comme nous l'avons vu précédemment;

— La viscosité des verres susceptibles de s'adapter à cette méthode de fabrication (bonnes qualités de travail à la canne, à la presse et au chalumeau);

— Les possibilités des fournisseurs concernant la fabrication de pièces de verrerie calibrées et de formes élémentaires;

— Le prix de revient de ces pièces et, par conséquent, la normalisation de leur façonnage mécanique avant utilisation.

Ces considérations et les différents essais exécutés ont déterminé la réalisation d'un certain nombre de pièces d'apport illustrées par la photo 15. Ces différentes pièces, que nous examinerons ci-après, sont :

1° Perles;
2° Bagues;
3° Enrobages préalables;
4° Plaquettes;
5° Spires;
6° Queusots.

1° *Perles et bagues.* — La figure 44 fera mieux comprendre cette forme d'apport. Le verre des

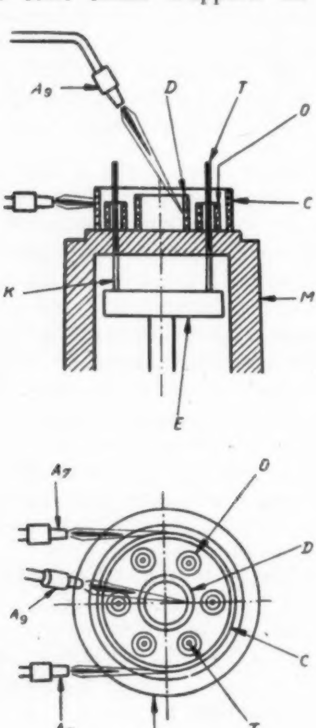


Fig. 44.

enrobages est apporté par des perles O analogues aux perles de verroterie pour jouets, enfilées sur les passages T, lesquels, positionnés dans la matrice M, reposent à leur partie inférieure sur les pistons K de l'éjecteur E.

Le supplément d'apport est alors assuré par des bagues C et D, portions de tubes coupées bien droit. On comprendra que ces bagues doivent être parfaitement calibrées et d'épaisseur constante. On emploie pour cela du tube étiré mécaniquement en verrerie, celui-ci étant ensuite tronçonné sur une machine automatique.

Cette machine que nous décrirons rapidement se compose d'une meule à poudre de diamant agglomérée, animée pendant sa rotation d'un mouvement alternatif vertical. A la remontée de la meule, c'est-à-dire après chaque tronçonnage, la bague coupée est éjectée par un jet d'air comprimé qui la projette dans un panier métallique immergé dans une cuve à l'intérieur de laquelle on fait une circulation d'eau. Les bagues obtenues sont ainsi lavées automatiquement et séchées ensuite. Ajoutons que cette machine est prévue pour tronçonner des bagues de différentes longueurs de 5 à 30^{mm} de diamètre.

Cette méthode d'apport s'applique surtout aux pieds de lampes en cristal avec passages copper-clad, et la fabrication du pied peut alors se résumer de la façon suivante :

L'enrobage se fait sur place à l'aide du chalumeau piqueur A_9 qui vient fondre le verre sur le passage par l'intérieur, tandis que les chalumeaux A_7 chauffent le verre par l'extérieur. On assiste ainsi au ramollissement général de toutes les pièces de verre et lorsque celui-ci est jugé suffisant, on abaisse le poinçon.

A aucun moment, les copper-clad nus ne doivent se trouver dans la flamme des chalumeaux car ils y seraient rapidement détruits. Cet incident est évité en employant des flammes extrêmement ténues dirigées uniquement sur le verre.

2° *Enrobages préalables.* — Si, comme cela paraît normal, on essaie d'appliquer cette même méthode à la fabrication de pieds en verre dur avec passages molybdène et tungstène, on se heurte à deux difficultés :

— Il est pratiquement impossible d'obtenir ici le verre sous forme de tubes étirés mécaniquement, cela parce que les verreries qui les produisent ne possèdent pas de machines et qu'une telle fabrication représente un trop faible débit pour en justifier l'installation;

— L'étanchéité des enrobages n'est guère satisfaisante.

La méthode d'apport par enrobages préalables tourne ces difficultés. L'étanchéité est alors parfaite, mais il est nécessaire, étant donné le procédé de fabrication, d'obtenir des enrobages de formes et dimensions constantes, rigoureusement positionnés sur le passage métallique. On comprendra qu'il soit pratiquement impossible d'obtenir de telles pièces en série par un simple façonnage à la main, même par des verriers qualifiés et que, seule, une fabrication mécanique et automatique, peut prétendre à un tel résultat avec un prix de revient très bas.

La machine [12], illustrée par la photo 13 et qui a été étudiée et réalisée au laboratoire, permet l'obtention de telles pièces dans les conditions imposées. Le principe en est le suivant :

Un plateau revolver vertical B_1, animé d'un mouvement de rotation autour de son axe et se déplaçant périodiquement d'un quart de tour, entraîne quatre pinces spéciales B_2 qui passent successivement à chacune des positions 1, 2, 3 et 4. Aux trois dernières positions, ces pinces sont également animées d'un mouvement de rotation, mais continu cette fois, autour de leur axe.

En position 1, chaque pince étant débrayée automatiquement pour permettre l'éjection de la pièce terminée et le chargement de la tige métallique vierge, on introduit le passage à enrober. Cette opération terminée, le plateau se déplace d'un quart de tour et amène la tige en position n° 2. Le plateau s'immobilise alors pendant un certain temps et la tige se trouve en rotation dans une flamme de chalumeau spécialement réglée pour l'oxydation du métal. Puis le plateau se déplace encore d'un quart de tour, amenant cette fois notre passage oxydé en position n° 3 qui est la position d'enrobage.

A cette position, une baguette de verre calibrée B_3 animée d'un mouvement d'avancement automatique et périodique suivant son axe, vient en contact avec notre tige toujours en rotation. Cette baguette et cette tige étant chauffées par des flammes de chalumeaux réglées à cet effet, l'extrémité de la baguette fond et s'enrobe sur le passage. A un certain moment, déterminé selon les dimensions d'enrobage que l'on désire obtenir, la baguette de verre B_3 s'arrête et se trouve coupée automatiquement par les flammes du chalumeau B_4. Le plateau se déplace à nouveau, toujours d'un quart de tour, amenant l'enrobage en position n° 4 pour parfaire la forme de celui-ci dans une flamme convenablement réglée. Après quoi, le plateau se déplaçant encore d'un quart de tour, amène l'enrobage terminé en position n° 1 d'où il est éjecté et remplacé par une nouvelle tige.

Cette éjection peut se faire, soit par l'intermédiaire d'une pédale B_5 actionnant un poussoir B_6, soit par un dispositif dont l'automatisme est synchronisé avec la rotation du plateau revolver. Les enrobages éjectés tombent sur un plan incliné B_7 pour être ensuite recueillis dans une boîte B_8.

La cadence de cette machine est de 150 à 400 enrobages à l'heure; ce débit, qui peut encore être augmenté, étant fonction du genre d'enrobage que l'on désire obtenir. Les baguettes de verre de longueur 1 m environ peuvent avoir un diamètre compris entre 4,2 et 5^{mm},8. En dehors de ces limites, il suffit de changer les molettes à l'intérieur de la boîte d'entraînement B_9. Enfin, l'apport de verre est constant à $5/10^e$ de millimètre près sur la longueur de descente de la baguette.

Ces enrobages ne sont pas recuits. Il est même préférable pour éviter la rupture et le décollement de ces joints d'utiliser ces enrobages trempés.

La figure 45 montre qu'avec cette méthode le verre est apporté uniquement par les enrobages et

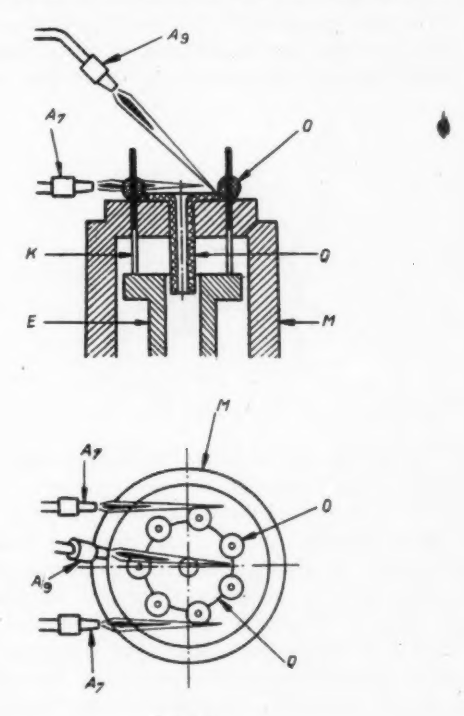


Fig. 45.

le queusot. Nous reviendrons sur celui-ci ultérieurement. Il n'y a donc plus à se préoccuper de la soudure verre-métal pendant la fabrication du pied, et la matière première verrerie est réduite à du tube

et de la baguette étirés à la main et calibrés. La suite des opérations peut alors se résumer ainsi :

Les enrobages sont chauffés intérieurement par le chalumeau piqueur au point de contact de ceux-ci avec l'évasement Q, et extérieurement par les chalumeaux horizontaux A_7, comme indiqué sur la figure 45.

Ce mode d'apport s'applique à des pieds avec traversées métalliques quelconques, sauf copper-clad. Il faut toutefois autant que possible que l'écartement des enrobages soit à peu près régulier (brochage aux sommets d'un polygone régulier) et qu'il permette un jeu d'environ 1 mm entre les perles de ceux ci. Dans le cas contraire (*fig.* 48), on procède à un apport de verre supplémentaire par un morceau de baguette ou autre X, d'importance massive proportionnelle à l'écartement, que l'on place sur la matrice entre les passages les plus éloignés. Cela permet une meilleure répartition du verre au moment du pressage.

3° *Plaquettes.* — Dans certains cas, pour des pieds de formes très spéciales (photos $18/_{12}$ et $18/_{13}$), on peut employer une autre méthode d'apport dite « par plaquette » et illustrée par la figure 46.

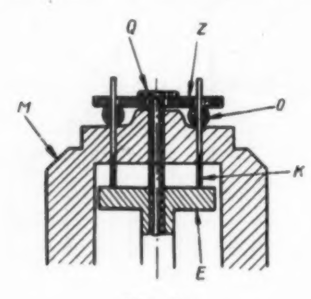


Fig. 46.

Ces pièces Z de forme circulaire, exécutées en verrerie par pressage et rodage, sont en général d'une épaisseur de l'ordre de celle du pied que l'on désire obtenir, mais d'un diamètre légèrement supérieur de 1 mm. Elles sont pourvues de trous assez larges au même entr'axe que les enrobages, permettant ainsi une mise en place plus rapide. Celle-ci a lieu après chargement des enrobages O et la plaquette Z repose alors sur ceux-ci. Cette position permet un meilleur chauffage de l'ensemble et diminue considérablement les risques de casse.

Dans le cas de pieds à queusots, ces pièces sont également pourvues d'un trou central permettant le libre passage de celui-ci.

Avec cette méthode d'apport, le principe de fabrication d'un pied reste toujours le même : ramollissement du verre puis pressage, opération au cours de laquelle la plaquette est appliquée sur la face de la matrice au niveau inférieur des enrobages. Ceux ci sont alors repoussés et noyés dans la plaquette (*fig.* 47).

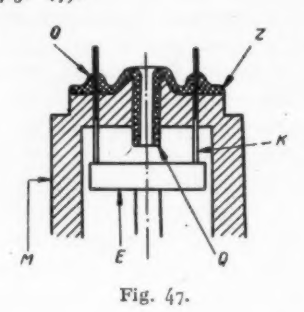


Fig. 47.

Comme dans la méthode précédente, lorsqu'un pied ne possède pas ses sorties à intervalles réguliers comme c'est le cas figure 48, on procède à un apport de verre supplémentaire X.

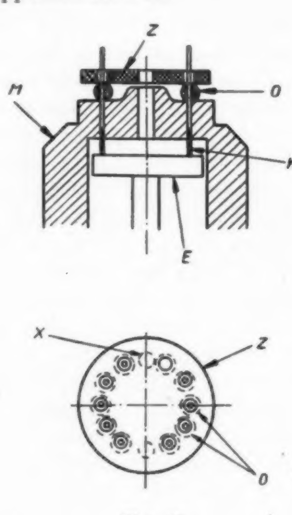


Fig. 48.

Étant donné la grande fragilité du verre plat au choc thermique, ce procédé ne peut guère s'appliquer qu'à des verres à faible coefficient de dilatation pour lesquels seulement des pièces de cette forme peuvent supporter le traitement qui leur est infligé par le feu violent des chalumeaux pendant la fabrication d'un pied.

Malgré cela, il est encore recommandé de préchauffer ces pièces avant leur chargement sur la matrice de manière à éviter les risques de casse.

Enfin, si cette méthode présente certains avantages, elle présente également un inconvénient, celui

d'augmenter assez sensiblement le prix de revient du pied.

En effet, ces plaquettes étant fabriquées à la presse, on est obligé d'envisager un moule spécial pour chaque type de pied. Puis ces pièces ne devant présenter aucune calcinure, il en résulte un certain déchet en verrerie. Enfin, l'opération de rodage telle qu'elle est encore pratiquée dans certaines verreries est assez coûteuse.

4° *Spires.* — Cette autre méthode, dite « méthode d'apport par spires », n'a pas les inconvénients de la précédente. Elle peut être utilisée pour tous les verres et appliquée à la fabrication d'un grand nombre de types de pieds.

Comme son nom l'indique, cette méthode permet d'apporter le verre sous la forme d'anneaux spiralés (photo 15), lesquels sont obtenus sur une machine automatique [18] réalisée au laboratoire et illustrée par la photo 16.

Le processus de fabrication de ces anneaux est très simple et peut se résumer ainsi :

Un mandrin en laiton E_1, d'aspect extérieur lisse, animé d'un mouvement de rotation autour de son axe, entraîne sur lui-même une baguette de verre E_2 amenée à une certaine plasticité par l'intermédiaire d'un chalumeau E_3. Pendant l'opération, cette baguette qui est maintenue verticalement, se déplace ainsi que son chalumeau longitudinalement par rapport au mandrin et s'enroule sur celui-ci à la manière d'un bobinage normal. On obtient alors une succession de spires qu'il est très facile de séparer.

Cette machine, pourvue de différents réglages, permet la réalisation de spirales très variées et les baguettes employées sont de simples baguettes de verre étirées et calibrées.

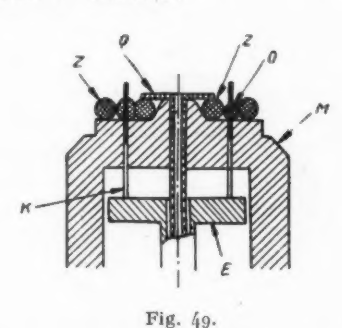


Fig. 49.

La figure 49 illustre le principe de chargement des pièces Z obtenues avec cette méthode et la fabrication d'un pied est la même qu'avec les méthodes précédentes; nous le généralisons de plus en plus et presque tous les pieds peuvent maintenant bénéficier de la considérable économie qu'elle permet.

5° *Queusots.* — Comme on peut le constater sur la photo 18, la plupart des pieds sont munis d'un queusot central destiné au pompage de la lampe.

Ce queusot, de longueur variable, représente un relief trop considérable pour qu'il puisse être obtenu directement par moulage, et l'on comprendra qu'il soit également impossible d'en envisager la soudure après la fabrication du pied, ceci étant donné la forme aplatie de celui-ci et la présence des traversées métalliques.

Il est donc nécessaire de souder ce queusot pendant la fabrication du pied, et de ce fait on comprendra qu'il puisse être considéré comme une pièce d'apport.

Ce queusot Q est un tube étiré et calibré, coupé à longueur et préalablement évasé sur une machine spéciale. La longueur du queusot et le diamètre de l'évasement étant déterminés suivant chaque type de pied.

Les figures 45, 46, 49, 50 et 51 indiquent les différentes méthodes de chargement de cette pièce sur la matrice.

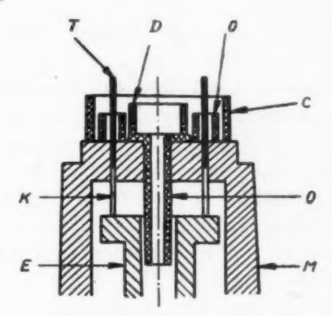


Fig. 50.

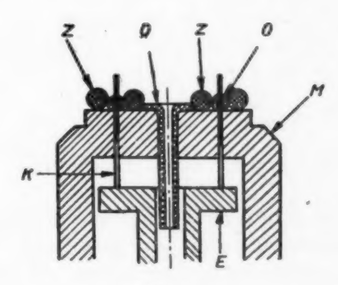


Fig. 51.

Dans tous les cas, seul le bord extérieur de l'évasement est porté à haute température par l'inter-

médiaire du chalumeau piqueur A_3, lequel, selon les dimensions du pied et les différents verres, peut être simple ou double. La ou les flammes de celui-ci doivent être orientées de façon qu'elles ne puissent jamais atteindre le canal central du queusot, ce qui risquerait de le boucher. Au moment du pressage, ce canal est alors protégé par un ergot S de forme spéciale, prévu sur le poinçon P, qui vient s'engager dans le trou du queusot en positionnant également ce dernier.

La pression sur le verre à cet endroit ne s'effectue qu'à l'entrée du queusot, comme indiqué sur la figure 52.

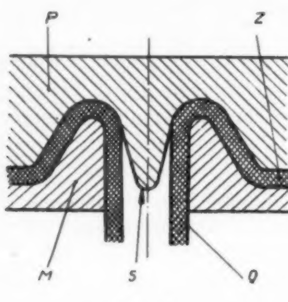


Fig. 52.

En général le bossage central existant dans certains cas (pieds photos $18/_{12}$ et $18/_{13}$) ne doit pas être trop accentué, car il deviendrait gênant pour la fabrication du pied. Il n'est indispensable que pour les pieds nécessitant l'apport par plaquette. Il est en effet nécessaire que celle-ci soit maintenue en son centre pendant l'opération de chauffage et, à plus forte raison, si elle doit supporter un queusot, ceci pour éviter son effondrement au moment du ramollissement.

Ce bossage a également l'avantage de diminuer la fragilité du pied et peut permettre dans certains cas, par le creux qu'il présente sur la partie inférieure, un culottage de protection du queusot lorsque la lampe est terminée. Cette protection peut également servir à l'orientation de la lampe dans son support.

III. — Recuisson des pieds.

On comprendra que ce procédé de fabrication de pieds impose un recuit sérieux de ceux-ci.

En effet, étant donné leur forme, ces pieds sont assez fragiles au choc thermique et ils doivent être totalement dépourvus de tensions internes. Il est donc indispensable que cette opération de recuit soit exécutée très soigneusement, car de graves accidents risqueraient de se produire, soit avant, soit au moment de la fermeture des lampes, entraînant ainsi des déchets considérables.

L'étuve de recuisson, illustrée par la photo 14, permet d'exécuter cette opération en toute sécurité.

Dès éjection de leurs moules, les pieds sont immédiatement mis en étuve et stockés dans cette dernière, laquelle se trouve en palier, à une température déterminée suivant les différents verres, pendant toute la durée de fabrication.

Le chargement se fait sur un plateau C_1, solidaire de la porte C_2, en commençant par la partie la plus éloignée de cette porte. Cela évite lors des chargements successifs, le refroidissement brutal par courant d'air des pieds déjà emmagasinés.

Lorsque l'étuve est pleine, ou que la fabrication est terminée, on amène celle-ci à la température de recuit par l'intermédiaire d'un régulateur, lequel peut dans certains cas être commandé par un transmetteur de programme.

Les écarts de températures à l'intérieur de cette étuve sont de l'ordre de 1 %.

IV. — Pieds a brochage direct.

On comprendra qu'étant donné leur forme, ces pieds puissent être dans la majorité des cas, utilisés sans culot. Il faut cependant pour cela que les passages du pied, qui sont dans ce cas les broches de la lampe, soient suffisamment rigides. Or cette rigidité dépend de la nature du métal employé et de ses dimensions en diamètre et longueur.

Si l'on désire cependant utiliser le brochage direct pour des pieds à broches non rigides, on peut, par exemple, soit utiliser un ferrochrome au lieu de

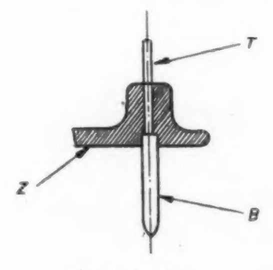


Fig. 53.

copper-clad, soit souder ou braser à l'extrémité de ce dernier une petite broche de nickel ou monel B. Cette broche qui prolonge le passage de copper-clad T vers l'extérieur du pied est engagée de 1 ou 2 mm dans le plateau de verre Z qui la maintient

L'étanchéité est alors assurée par le passage lui-même qui, au-dessus de la broche, est enrobé au verre sur une plus grande longueur (*fig.* 53).

Dans le cas où une solution semblable n'est pas possible, et où un culot est indispensable, cette méthode de fabrication permet encore le culottage du pied en supprimant le scellement du culot à la lampe (*fig.* 54).

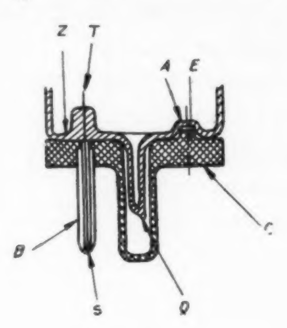


Fig. 54.

On emploie un culot en matière isolante C pourvu de trous ou de broches métalliques B placés à écartement des douilles du support, lequel écartement peut ne pas être exactement celui du pied. Les passages sont introduits selon les cas dans les trous ou les broches et y sont soudés S. Le culot est alors maintenu à la lampe par ces soudures et les efforts de torsion sont éliminés par la présence de bossages E solidaires du culot, pénétrant dans des alvéoles A de forme et dimensions correspondantes venues avec le pied au moment de sa fabrication [14].

V. — Exploitation du procédé.

Ce procédé, exploité industriellement, a permis la réalisation de plusieurs milliers de lampes de types très différents.

La photo 17 représente un atelier équipé pour une telle fabrication, et la photo 18 illustre quelques types de pieds exécutés avec des verres très différents et des métaux très divers tels que : copper-clad, ferrochrome, kovar, molybdène, tungstène.

Le personnel, en général féminin, employé à cette fabrication, n'est pas un personnel qualifié; aucune de ces ouvrières n'avait approché une machine de verrerie et ne connaissait le travail du verre.

Pour la fabrication des pieds, la durée d'apprentissage peut être évaluée à un mois, mais après 15 jours le rendement d'une ouvrière apprentie peut être de 50 % comparativement au rendement d'une ouvrière formée. Quant à la préparation des pièces d'apport qui, nous l'avons vu, est automatique, celle-ci ne demande pour ainsi dire aucun apprentissage.

En ce qui concerne le prix de revient, on sait que celui-ci dépend en partie :

1° De la matière première employée;
2° Du procédé de fabrication, fonction de la quantité de pièces, c'est-à-dire de la série;
3° Du déchet;
4° De la main-d'œuvre.

Or, en plus des avantages techniques, nous avons vu qu'au point de vue qualité, cette méthode permet le montage des lampes par des moyens mécaniques, voire automatiques.

Nous avons également constaté qu'elle utilise une matière première sous des formes très simples, faciles à obtenir des fournisseurs. Nous avons vu, d'autre part, que le façonnage de cette matière se fait automatiquement, sur des machines très simples, d'une grande souplesse et d'un prix de revient raisonnable, par un personnel non qualifié et facilement remplaçable. Quant aux déchets, ils sont de l'ordre de 5 à 6 % pour les pieds et à peu près inexistants pour les pièces d'apport.

Étant donné ces considérations, on comprendra donc que le prix de revient de ces pieds soit très bas comparativement à ceux réalisés précédemment par une main-d'œuvre qualifiée, rare et par conséquent coûteuse.

Conclusion.

Ce procédé, mis au point il y a quatre ans et qui, par suite des circonstances, n'a été exploité que depuis fin 1944, permet donc d'obtenir des pieds d'une étanchéité toujours parfaite, d'un encombrement très réduit, très bien calibrés et susceptibles de recevoir des montages de lampes parfaitement ajustés mécaniquement. Quant au culottage de la lampe, il peut être soit supprimé dans la majorité des cas, soit très simplifié.

Enfin, étant donné la simplicité des moyens mis en œuvre et la modicité de l'effort imposé à la main-d'œuvre, cette méthode permet également la réalisation de petites et moyennes séries à des prix de revient très bas.

BIBLIOGRAPHIE.

1. Bernard Long, *Propriétés physiques et fusion du verre.*
2. Brevet français n° 784.667 (Corning Glass Work).
3. Brevets français n°s 508.194, 485.813 (add. n° 41.853).
4. Brevets français n°s 507.814 et 507.815.
5. Brevet français n° 489.939.
6. Brevet français n° 492.386.
7. Brevet français n° 455.272.
8. Brevets français n°s 494.142, 492.553.
9. Brevet français n° 482.539.
10. Brevet français n°s 498.698 et 506.985.
11. Brevet français n° 507.398.
12. Brevet français n° 485.590.
13. Brevet français n° 507.813.
14. Brevet français n° 512.498.

MESURE DES CHAMPS MAGNÉTIQUES FAIBLES ET DES EFFETS DE BLINDAGE. APPLICATION AU MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE

PAR D. CHARLES,

Docteur ès Sciences,
Laboratoire de Recherches « Optique électronique et Télévision »
de la Compagnie Générale de Télégraphie sans fil.

SOMMAIRE. — *L'étude porte sur la mesure des champs magnétiques alternatifs faibles parasites et sur les effets de blindage. Une méthode de mesure est donnée, ainsi que le principe d'étalonnage. Application est faite d'abord à l'étude des blindages cylindriques avec et sans trou latéral. L'application des formules permet la détermination du coefficient μ de permabilité.*

Ensuite sont données les valeurs des intensités des champs parasites provenant, soit des alimentations haute tension, soit des machines électriques en fonctionnement dans le laboratoire. De la comparaison des chiffres trouvés pour les champs parasites et pour les coefficients de blindage sont déduites les conditions à réaliser pour protéger un appareil sensible comme le microscope électronique.

Introduction.

La construction et la mise au point du microscope électronique C. S. F. ont exigé un certain nombre d'études annexes. C'est le cas de l'étude des champs magnétiques alternatifs parasites et du remède à leurs effets.

Ces champs qui rendent floue l'image et, par suite, limitent le pouvoir séparateur ont plusieurs sources; soit des sources externes : alimentation haute tension du microscope lui-même, machines électriques plus ou moins proches; soit des sources internes : filament émetteur alimenté en alternatif.

L'étude a porté sur la mesure des champs et sur l'efficacité des blindages.

Méthode de mesure et appareillage.

Un circuit de faible encombrement mais de grande surface électrique, enfermé dans une boîte en aluminium de 1/10e de millimètre est réuni par connexion blindée à un amplificateur comportant deux étages à penthodes EF 6 et une redresseuse EB 4 donnant une amplification en volts d'environ 10 000 pour une bande de fréquences de 50 à 1000 Hz.

L'alimentation des filaments est prise sur un accumulateur 6 V 90 AH et la haute tension est fournie par un stabilisateur à lampe donnant 250 V stables à 1 ‰ près.

L'étalonnage est fait à l'aide d'une spire unique calculable, de 76,7 cm de diamètre, donnant un champ étalon.

Celui-ci demande beaucoup de précautions, en ce sens qu'il doit être fait en l'absence totale de champ parasite, ce qui n'est guère réalisable que la nuit, pendant une période de fêtes où aucune des usines voisines ne travaille.

La déviation de l'indicateur de sortie de l'ampli est une fonction linéaire du champ. Un jeu de deux bobines exploratrices est employé :

— L'une donnant $1,8 . 10^{-5}$ gauss/μA de courant de sortie;

— L'autre donnant $0,95 . 10^{-5}$ gauss/μA de courant de sortie.

Le bruit de fond, exprimé en courant de sortie est de l'ordre de 1 μA. La stabilité permet de lire 0,5 μA. Il était donc possible de mesurer des champs de 10^{-5} gauss.

La détermination des coefficients de blindage se fait de la manière suivante :

La bobine exploratrice est introduite dans le blindage, l'ensemble, dûment orienté, est placé au centre de la bobine calculable, et pour un certain courant d'excitation, le microampèremètre donne une indication qui, traduite en champ magnétique, représente le champ intérieur H_{int}. La valeur du courant d'excitation permet le calcul du champ extérieur H_{ext}.

Le coefficient de blindage est

$$G = \frac{H_{ext}}{H_{int}}. \qquad (1)$$

Détermination des coefficients de blindage.

a. Blindage d'oscillographes. — Les aciéries d'Imphy fournissent des blindages en forme, en μ métal, pour les oscillographes, et donnent comme coefficient de 25 à 50.

La détermination pour le modèle T 8 nous a fourni la valeur 30 à 3 % près.

b. Vérification des formules. — On sait que le coefficient de blindage d'un cylindre, pour un champ constant, est donné par la formule approchée

$$G = \frac{\mu}{4}\left(1 - \frac{a^2}{b^2}\right) \qquad (2)$$

μ perméabilité,
a rayon intérieur,
b rayon extérieur,

et pour deux cylindres coaxiaux

$$G = \frac{\mu^2}{16}\left(1 - \frac{a^2}{b^2}\right)\left(1 - \frac{c^2}{d^2}\right)\left(1 - \frac{b^2}{c^2}\right) \qquad (3)$$

μ perméabilité,
a rayon intérieur du premier cylindre,
b » extérieur » »
c » intérieur du deuxième »
d » extérieur » »

Pour le μ métal ces formules restent valables pour un champ alternatif de fréquence 50. Seule la valeur de μ à utiliser est malaisée à connaître.

Nous avons procédé de la manière suivante : pour un même échantillon de μ métal, un seul cylindre, puis deux cylindres coaxiaux sont étudiés, l'application des formules (2) et (3) donne deux valeurs de μ qui doivent être égales à la précision des mesures et à la validité des formules près.

Le Tableau I résume les résultats obtenus.

TABLEAU I.

μ métal $e = 4/10$.	G mesuré.	Erreur relative (%).	μ calculé.
Un seul cylindre $\Phi = 9$ cm	11,6	2	4100
Deux cylindres coaxiaux $\Phi = 9$ cm et $\Phi = 8$ cm	47,2	2	4400

On peut donc utiliser ces formules à la détermination d'une valeur moyenne de μ et en déduire ensuite le coefficient de blindage pour d'autres modèles du même métal.

c. Blindages avec trous. — Si le blindage est utilisé avec une lentille électrostatique à trois diaphragmes, par exemple comme sont celles du microscope C. S. F., il est nécessaire de le percer d'un trou pour l'arrivée de la haute tension. Il nous a paru utile de voir l'influence du trou sur le coefficient de blindage.

Les blindages du Tableau I ont été percés d'un trou circulaire latéral de 2 cm de diamètre.

Les résultats sont résumés dans le Tableau II.

TABLEAU II.

Orientation du trou par rapport au champ	G mesuré	Perte sur G en % à cause du trou
H	10,1	5 %
H	8,8	17 %
H	46,8	1 %
H	33,2	30 %
H	40,6	14 %
H	41,5	12 %

Ce tableau montre que si l'axe du trou est parallèle au champ, la perturbation est faible, presque négligeable, et qu'au contraire si l'axe du trou est perpendiculaire à la direction du champ la perturbation est considérable.

Étude des champs parasites.

a. Champs parasites extérieurs. — Ces champs parasites proviennent :

1° De l'ensemble du laboratoire;

2° D'un bloc d'alimentation de rayons X (100 000 V-25 mA) utilisé pour les essais de microscopes, lequel est à environ 5 m de ceux-ci;

3° Des moteurs et alimentations des pompes.

Le Tableau III contient le résultat des mesures de ces champs, la bobine exploratrice étant placée au voisinage de la première lentille du microscope, à l'extérieur du tube, et orientée dans chaque cas, de telle sorte que l'indication soit maximum. Les mesures ont été faites la nuit, en l'absence du champ parasite résiduel du laboratoire.

Si l'on admet l'additivité, on trouve $4{,}6.10^{-4}$ gauss.

Ces chiffres sont en bon accord avec ceux donnés par von Ardenne [1].

b. Champs parasites intérieurs. — Ils sont uniquement dus au filament émetteur, quand celui-ci est chauffé en courant alternatif.

Le champ sur l'axe du microscope à 12,5 cm du filament pour un courant de chauffage de 2 A est

TABLEAU III.

Opérations.		Champ en gauss.
	Champ parasite résiduel.	3.10^{-4}
Bloc de pompage	Mise en route de la pompe à palettes	5.10^{-5}
	+ Pompe à condensation	9.10^{-5}
Bloc d'alimentation B. T. et H. T.	Mise sous tension de l'autotransfo	5.10^{-5}
	+ Alimentation des filaments des kenos	10^{-4}
	+ 60 000 V sous 600 μA.	$1{,}5.10^{-4}$

de $4{,}8.10^{-4}$ gauss. Un blindage convenable permet de le réduire à 10^{-4} gauss environ.

Conclusion.

Cette étude a conduit à la réalisation de blindages suffisamment efficaces pour que le microscope électronique de la C. S. F. reste parfaitement insensible aux champs magnétiques parasites habituels, gardant dans tous les cas son excellent pouvoir de résolution.

(1) VON ARDENNE, *Elektronen Uebermikroskopie*, Berlin, 1940, p. 111.

TRANSMISSIONS TÉLÉPHONIQUES EN MILIEU BRUYANT

PAR G. NICOLLE,

Ingénieur à la Société Indépendante de T. S. F.

SOMMAIRE. — *Il est connu que les conditions rencontrées dans certains milieux bruyants, en particulier à bord d'avion, rendent difficile, ou même impossible, l'utilisation des appareils téléphoniques conventionnels.*

La principale difficulté réside dans la séparation de la parole à transmettre et des bruits extérieurs simultanément reçus par le microphone.

Le premier moyen proposé — suffisamment efficace dans de nombreux cas — consiste à améliorer le rapport du signal aux bruits en agissant directement sur la transmission de chacun de ces deux facteurs : sur celle du signal — à favoriser — en rendant possible l'utilisation du microphone, à proximité immédiate de la bouche de l'opérateur; sur celle des bruits — à atténuer — en rendant l'appareil aussi directionnel que possible et en l'isolant acoustiquement par un boîtier spécialement conçu.

Le deuxième moyen proposé, d'une efficacité supérieure à celle du précédent, consiste à mettre à profit une action différentielle entre deux éléments microphoniques, également sensibles aux bruits ambiants, un dispositif directionnel permettant à la parole d'agir de façon plus intense sur l'un de ces éléments.

On obtient ainsi, sans dispositifs absorbants d'isolation acoustique, une amélioration très importante du rapport du signal aux bruits.

Un matériel de phonométrie a dû être spécialement créé par la Société Indépendante de Télégraphie sans Fil pour l'essai de ces microphones. Il permet en particulier de placer les appareils à essayer dans des conditions de travail identiques à celles rencontrées dans la pratique.

I. — CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES.

A. **Situation du problème**.

Une des caractéristiques les plus gênantes de nos conditions de vie actuelle est le bruit, conséquence du développement toujours croissant du machinisme devenu la base de la plupart des activités humaines.

Si le fonctionnement des organismes vivants (organisme humain ou animal) est remarquablement silencieux, il s'en faut encore de beaucoup pour qu'il en soit ainsi des mécanismes créés par l'homme. Un effort considérable est tenté dans ce sens, et l'on peut dire dans quelques cas, avec succès. Mais l'insonorisation recherchée n'est encore obtenue que dans un domaine très restreint, et pendant encore de nombreuses années, l'homme devra vivre et converser au milieu du bruit dû à l'imperfection de ses conceptions.

Or, il existe des milieux (carlingues et fuseaux moteurs d'avion, plateformes d'essai de moteurs, ateliers de métallurgie) dans lesquels le bruit est d'une intensité telle que — suivant l'expression commune — il « couvre entièrement la voix ».

Il pourrait sembler avantageux pour remédier à la difficulté dans laquelle se trouvent deux interlocuteurs situés dans un tel milieu, de les relier par téléphone. L'audition serait améliorée par le port des écouteurs téléphoniques, au besoin spécialement munis d'oreillettes acoustiquement isolantes.

On sait, en effet, que l'ouïe par une réaction de défense, se désensibilise d'elle-même, sous l'influence de sons ou de bruits qu'elle ne pourrait supporter sans douleur.

L'avantage incontestable acquis pour l'audition,

par la protection acoustique du casque, ne présente d'intérêt que si le microphone, spécialement conçu, ne retransmet pas à la fois, par voie électrique, sur le circuit des casques, la voix et le bruit, à leurs niveaux respectifs.

Le problème est ainsi reporté à la prise de son qui doit être assurée par des microphones munis de dispositifs particuliers faisant l'objet principal du présent exposé.

B. Définition du milieu.

Il a été dit précédemment que le bruit pouvait être tel qu'il « couvre entièrement la voix », et rendait de ce fait impossible l'échange de conversations.

Cela revient à définir l'intensité de la voix, l'intensité du bruit et le rapport voix-bruit à partir duquel l'échange d'une conversation devient sinon facile, du moins possible.

a. Intensité physique des sons ou bruits. — Il est rappelé que, par convention, le niveau d'un son mesuré en décibels au-dessus du seuil d'audibilité (de niveau défini égal à 10^{-16} W : cm²) s'exprime en phones.

Le phone est donc pratiquement le plus petit échelon d'intensité qu'il est possible de percevoir dans les conditions habituelles d'audition. On distingue de 120 à 150 échelons entre le seuil de la douleur et le seuil d'audibilité.

Les intensités suivantes de sons ou bruits usuels sont donnés ci-après à titre d'exemple :

	Phones.
Ambiance calme, rue tranquille...........	40
Conversation normale, à 1 m de la source..	55
Ambiance moyennement bruyante, atelier, véhicules..............................	70
Conversation à voix forte, à 1 cm de la source (de bouche à oreille)............	90
Ambiance bruyante, carlingue ou fuseau moteur d'avion.........................	80 à 100

L'expérience montre qu'une conversation peut s'échanger, lorsque le niveau du son reçu excède de 20 phones environ celui des bruits ambiants.

Ainsi, il est possible de converser à 1 m de distance dans une rue tranquille (55 phones de signal pour 40 phones de bruits), ou de converser à plus faible distance dans un atelier bruyant (90 phones de signal pour 70 phones de bruits).

Par contre, dans un avion bruyant, il est très malaisé de se comprendre (90 phones de signal pour 90 phones de bruits) et toute conversation devient d'ailleurs impossible dans certains endroits (90 phones de signal pour 110 phones de bruits).

A noter que si le rapport correspondant à une bonne intelligibilité (20 décibels) est conservé, le niveau en phones, auquel s'établit la conversation n'intervient pas, si la précaution est prise de ramener ce niveau, au tympan, à une valeur admissible pour celui-ci, par l'interposition d'un écran absorbant placé sur l'oreille.

Ainsi il est connu qu'en milieu très bruyant, une meilleure audition peut être obtenue par pression du doigt sur le cartilage avant de l'oreille (tragus), obturant ainsi le conduit auditif externe.

b. Fréquences des bruits. — Le spectre en fréquence des bruits parasites intervient également. Il est en général très étendu, et la gamme des fréquences fondamentales vocales (200-3500 p : sec) s'y trouve la plupart du temps située. Aussi n'existe-t-il pas de solution générale consistant à filtrer électriquement telle fréquence pour l'éliminer de la transmission. Les bruits comportant de très nombreux harmoniques s'étendant sur toute la bande des fréquences reproduites, il y a cependant intérêt à réduire par l'effet de filtres électriques, la largeur de la bande transmise à la valeur nécessaire pour une reproduction convenable de la voix.

Le résultat obtenu par ce moyen qui a seulement pour effet la suppression de la transmission des fréquences situées au-dessous de 200 p : sec et au-dessus de 3500 p : sec, est dans la plupart des cas tout à fait insuffisant.

Dans le cas de bruits d'avion notamment, la fréquence fondamentale des bruits est de l'ordre de 300 p : sec coïncidant ainsi avec la fréquence fondamentale de la voix; elle est d'ailleurs variable, suivant la vitesse de rotation des moteurs.

Il y a en effet lieu de tenir compte de la forme très complexe des vibrations acoustiques parasites, explosions générant des ondes de choc, hélices produisant des sifflements, etc., qui entrent dans la composition des bruits du milieu ambiant.

La fréquence d'un bruit ne peut être définie comme celle d'un son pur; il y a généralement superposition de plusieurs régimes périodiques entre lesquels se produisent des battements, chacun de ces régimes pouvant être considéré, suivant la représentation de Fourier, comme la superposition de vibrations sinusoïdales harmoniques.

Il en résulte des fréquences complexes s'étendant dans tout le domaine du spectre vocal, et ne pouvant, de ce fait, être éliminées par voie de filtrage électrique, sans atténuation simultanée du signal.

Il faut donc recourir à des moyens intervenant au tout premier stade de la transmission, c'est-à-dire à la prise de son par le microphone, ces moyens tendant à l'augmentation du rapport entre le signal vocal transmis et le signal parasite.

C. Définition des échanges.

Un facteur supplémentaire de nature psychologique intervient dans l'intelligibilité et la valeur du rapport signal-bruit minima nécessaires pour permettre l'échange de conversations : la nature même des communications échangées, et celle des relations entre les interlocuteurs.

Ainsi le rapport de 20 db (conversation à voix normale à 1 m de distance, dans une rue tranquille), assure, à deux interlocuteurs ne se connaissant pas mutuellement, l'échange aisé d'une conversation sur un sujet quelconque.

Une réduction de ce rapport (à 10 db ou même moins) peut être consentie, si les interlocuteurs, en nombre réduit, et se connaissant mutuellement (cas des membres de l'équipage d'un avion) parlent de questions connues (transmission d'ordres, par exemple).

Plusieurs cas peuvent donc être distingués, dans le sens croissant des intelligibilité et rapport signal-bruit nécessaires :

1° Interlocuteurs se connaissant, n'utilisant qu'un vocabulaire restreint de mots usuels (cas de transmission d'ordres);

2° Interlocuteurs se connaissant, utilisant un vocabulaire plus étendu (cas de transmissions de renseignements, noms géographiques, nombres, etc.);

3° Interlocuteurs se connaissant peu, parlant de questions inconnues de l'un d'eux (cas éventuel d'usager du téléphone urbain).

Il est bien entendu que l'obtention de l'intelligibilité et du rapport signal-bruit les plus élevés, demeurent souhaitables dans les trois cas, si le matériel de transmission peut les fournir sans que d'autres considérations telles que poids, encombrement, simplicité de construction en limitent l'emploi.

D. Qualités requises pour un microphone anti-bruits.

Il est rappelé que les microphones faisant l'objet de la présente étude sont utilisés en milieu bruyant uniquement pour la transmission de la parole. L'énumération suivante indique les principales qualités requises :

a. Propriétés acoustiques. — 1° Augmentation du rapport signal-bruit par l'application de principes décrits ci-dessous (augmentation de la directivité, isolation acoustique, montage différentiel);

2° Possibilité de fonctionnement sous pressions sonores élevées, sans effet de saturation;

3° Reproduction linéaire en amplitude d'une gamme de fréquences s'étendant de 200 à 3500 Hz.

b. Propriétés électriques. — 1° Efficacité suffisante pour qu'il ne soit pas nécessaire d'avoir recours à une chaîne d'amplification trop importante;

2° Impédance de sortie, si possible conforme aux normes P. T. T. ou S. T. T. Aé;

3° Fonctionnement n'exigeant pas l'intervention d'une source à courant continu (cas des normes S. T. T. Aé);

4° Stabilité dans le temps des caractéristiques électriques.

c. Propriétés mécaniques. — Légèreté, maniabilité, robustesse, résistance aux conditions d'ambiance, température, pression, humidité, stabilité, dans le temps, des matériaux utilisés.

II. — Examen théorique du fonctionnement du microphone anti-bruit.

A. Détermination du principe.

Le but à atteindre est, comme il a été précédemment indiqué, l'augmentation du rapport de l'intensité du signal à celle du bruit reçu simultanément par le même appareil.

L'examen de la nature des sources sonores générant signal et bruit montre combien ces deux sources sont différentes.

Le signal, qui est la voix humaine modulée par la parole, est généré presque ponctuellement, si l'on considère l'émission vocale dans la zone située à proximité immédiate de la bouche de l'opérateur.

Le bruit, ou plutôt les bruits sont généralement dus à un très grand nombre de causes perturbatrices dont les actions se superposent. Par suite de nombreuses réflexions sur les parois de l'enceinte, on ne peut plus considérer l'existence d'une source mais d'une infinité de sources, situées dans toutes les directions de l'espace.

Si le microphone est rendu directionnel au point de n'être plus sensible qu'aux vibrations générées

dans un angle solide très réduit, le signal n'aura rien perdu de son intensité, puisque sa source, quasi ponctuelle, est contenue dans cet angle; par contre, les bruits seront fortement réduits puisque, seuls, ceux dont la source est contenue dans l'angle solide précédemment défini intéresseront le microphone. De plus, un effet complémentaire important d'atténuation sera obtenu par la présence de la tête de l'opérateur située dans l'angle solide, et masquant ainsi une partie des sources de bruits qui y sont contenues.

Le principe essentiel d'un microphone antibruit consiste donc à rendre cet appareil aussi directif que possible, c'est-à-dire sensible seulement aux vibrations acoustiques dont les sources sont contenues dans un angle solide très aigu.

Une caractéristique complémentaire de l'appareil est d'assurer une bonne transmission de la voix dans des conditions d'utilisation conduisant à de très fortes variations de pression acoustique.

Il y a en effet un intérêt évident à placer le microphone aussi près que possible des lèvres. La décroissance des variations de pression acoustique est très rapide dans les premiers centimètres d'éloignement du microphone des lèvres de l'opérateur (*fig.* 1).

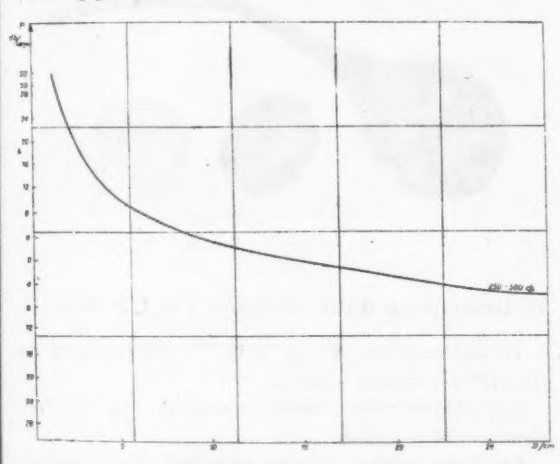


Fig. 1. — Pressions acoustiques dues à la parole, en fonction de la distance du microphone à la bouche, pour la bande de fréquence 250-500 Hz.

Par exemple, en exprimant en valeurs absolues les pressions portées en décibels sur la courbe visée ci-dessus, on remarque que si la pression à 1 cm des lèvres atteint 75 baryes/cm², celle-ci n'est plus que de 20, 10, 6, 4 et 2,5 baryes/cm² aux distances respectives de 2, 3, 4, 5 et 6 cm.

S'il existait donc une possibilité de prise de son à la hauteur même des lèvres, le problème serait en grande partie résolu sans autre précaution, du moins dans les bruits de niveau n'excédant pas 90 phones.

Le niveau de la parole étant à cet endroit, d'environ 110 phones, excéderait de 20 phones celui des bruits ambiants et une bonne transmission pourrait être assurée dans ces conditions.

Malheureusement, il est impossible pratiquement de placer le microphone à une distance inférieure à 1,5 ou 2 cm des lèvres, pour des raisons de commodité et d'hygiène, et de ce fait, la pression d'utilisation est limitée à 14 baryes environ.

Le microphone doit être prévu pour fonctionner correctement sous cette pression relativement élevée, et ne pas réagir au souffle. Le gain de l'amplification de la chaîne de transmission doit être réglé, pour que la tension normale de sortie appliquée aux écouteurs soit obtenue pour cette pression d'entrée; ce gain doit être constant, et toute saturation doit être soigneusement évitée.

Les moyens exposés ci-après permettent d'obtenir les propriétés de directivité et de fonctionnement sous pression élevée nécessaires.

B. Solution obtenue par isolation acoustique.

Cette solution déjà connue, et que nous citons pour mémoire, consiste à munir le microphone d'un pavillon et à enfermer la cellule sensible à l'intérieur d'un boîtier épais acoustiquement isolant. La membrane vibrante du microphone n'est mise en relation avec l'air ambiant que par le pavillon à proximité immédiate duquel parle l'opérateur. De plus, le pavillon est spécialement conçu pour favoriser seulement la transmission d'ondes acoustiques générées dans son axe; il peut être constitué par un grand nombre de canaux parallèles de très faible diamètre; les réflexions d'ondes sur ses parois sont ainsi très réduites.

On utilise ainsi au mieux, grâce au pavillon, les variations de pression acoustique dues à la voix et l'on réduit la transmission directe des bruits ambiants par les deux effets combinés de directivité très marquée du pavillon et d'isolation acoustique du boîtier.

Dans ce dernier effet, une limite est rapidement atteinte, car une atténuation importante par interposition d'un matériau insonore, ou même d'une combinaison judicieuse de matériaux de diverses natures, conduit à un poids et à un encombrement inadmissibles pour un microphone portatif devant demeurer très maniable.

C. **Solution obtenue par montage différentiel.**

Cette solution consiste à utiliser une combinaison de deux éléments microphoniques identiques montés électriquement en opposition et placés côte à côte. Si la distance entre les deux éléments et la dimension de ceux-ci sont petites vis-à-vis de la longueur d'onde acoustique la plus courte reçue, et si une symétrie mécanique et électrique parfaite du montage est réalisée, au besoin par ajustage d'impédances insérées dans les circuits de chaque élément, la tension de sortie résultant de l'action d'une onde sonore située sur cet ensemble est nulle.

Il suffit alors d'obtenir que la parole n'agisse pas avec la même amplitude sur les deux éléments microphoniques, par l'adjonction d'un système directif disposé de telle sorte que la symétrie précédemment acquise pour les bruits extérieurs puisse être sensiblement maintenue.

Il apparaît, dans ces conditions, aux bornes de sortie de l'ensemble une tension modulée à la fréquence de la parole, résultant de la différence des tensions générées par chaque élément.

L'atténuation ainsi obtenue n'est limitée que par la fidélité en amplitude et en fréquence des deux éléments microphoniques, dont les réponses doivent être rigoureusement identiques dans toute la gamme des fréquences considérées.

Le poids et l'encombrement peuvent être réduits par suite du jumelage des deux éléments microphoniques possédant des parties communes.

Ainsi, dans le cas d'emploi de microphones à rubans, le circuit magnétique qui est la partie lourde et encombrante de l'appareil est unique et contient les deux rubans.

On peut donc dire que dans ce cas, le système d'atténuation a le poids et l'encombrement d'un ruban.

III. — Réalisation de microphones « SIF ».

A. **Description du microphone « S. I. F. MD.6 ».**

Le microphone S. I. F. MD.6 correspond à la première solution décrite. Il est réalisé sous forme particulièrement maniable (*fig.* 2).

La cellule microphonique est du type électrodynamique, à membrane vibrante, et à aimant permanent. C'est un microphone du type dit « à pression ».

La cellule est contenue à l'intérieur d'un boîtier de caoutchouc épais, étanche, moulé sur le cordon souple contenant les conducteurs de branchements. Seul, l'avant du boîtier est mis en relation avec l'extérieur par un pavillon constitué par une embou-



Fig. 2.

chure fermée par un disque percé de canaux parallèles de petit diamètre (*fig.* 3).



Fig. 3.

B. **Description du microphone « S. I. F. MD.7 ».**

Le microphone S. I. F. MD.7 correspond à la deuxième solution décrite.

Les cellules microphoniques sont du type électrodynamique à ruban.

Les deux cellules utilisent le même circuit magnétique à l'intérieur duquel sont installés parallèlement les deux rubans. Ces deux rubans sont séparés par une pièce relais faisant partie du circuit magnétique. Les deux rubans sont montés électriquement en opposition et leurs extrémités libres sont connectées aux bornes du primaire d'un transformateur d'adaptation à la ligne.

Un pavillon très directif, à proximité immédiate duquel l'opérateur parle, est orienté vers l'un des peux rubans.

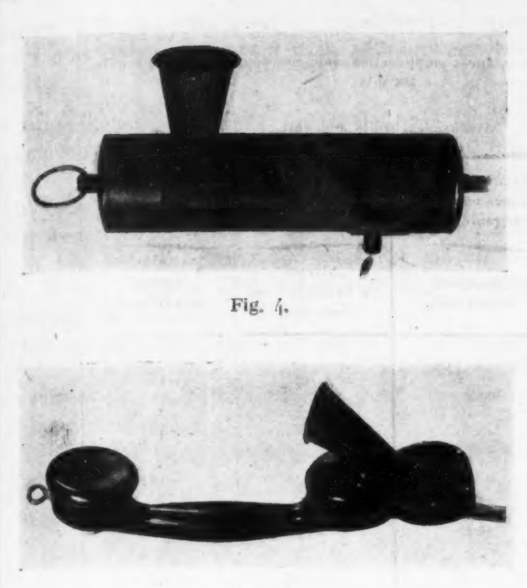


Fig. 4.

Fig. 5.

La transmission de la voix est ainsi favorisée par rapport aux bruits extérieurs, si l'on considère que sont éliminés en grande partie ceux qui parviennent simultanément aux deux rubans, et que ne sont transmis que ceux qui parviennent par le pavillon, malgré l'effet de masque dû à la tête de l'opérateur.

Le microphone est réalisé soit en appareil tenu à la main par un manche, soit en combiné téléphonique (*fig.* 4 et 5).

C. **Résultats obtenus**.

Quelle que soit la solution adoptée, il y a un intérêt évident à placer le microphone aussi près que possible des lèvres. La décroissance des variations de pression acoustique est très rapide dans les premiers centimètres d'éloignement.

Aussi les résultats mentionnés ci-après tiennent-ils compte de ces conditions particulières d'utilisation du microphone, 1,5 cm des lèvres de l'opérateur.

a. Des caractéristiques moyennes relatives aux affaiblissements ont été relevées pour les deux microphones S. I. F. MD.6 et MD.7, et pour divers autres types d'appareils. Elles figurent sur le tableau ci-après :

Type d'appareil.	Atténuation dans la transmission des bruits extérieurs.	Efficacité de tension effectuée après adaptation sur charge de 500 000 Ω.	Intelligibilité pour cent de logatomes.	Impédance mesurée à 1000 Hz.
	db	V	%	Ω
Microphone à charbon, type « Solid-Bach »	0	3	70	200
Microphone à charbon, type américain pour avion	6	2	68	120
Laryngophone électromagnétique	30	0,8	50 à 60	75
Microphone « S.I.F. MD-6 »	12	0,2	75	50
Microphone « S.I.F. MD-7 »	21	0,007	90	0,01

b. Caractéristiques générales comparées. — La propriété « anti bruits » de microphones ayant été précédemment définie par l'atténuation des bruits extérieurs transmis par ceux-ci, deux autres caractéristiques essentielles restent à considérer, pour comparer ces appareils aux matériels existants : ce sont l'efficacité et l'intelligibilité.

Ces diverses caractéristiques sont groupées dans le tableau ci-après, pour plusieurs types de microphones.

Les conditions dans lesquelles l'atténuation a été mesurée sont celles du tableau précédent.

L'efficacité est pratiquement définie par la tension délivrée aux bornes de l'enroulement secondaire d'un transformateur d'adaptation alimenté par le microphone, et débitant sur une charge de résistance élevée (500 000 Ω), cette tension est mesurée pour une émission vocale d'intensité moyenne effectuée à 1,5 cm de l'appareil.

L'intelligibilité est définie en pourcentage par la méthode conventionnelle des logatomes.

De plus, l'impédance à 1000 Hz des divers appareils est mentionnée à titre documentaire.

Désignation de l'appareil.	Puissance moyenne utile, après amplification, ramenée pour tous les appareils, à 500 mW. — Niveaux des bruits ambiants			
	90/93 phones (moteurs à explosions sans pot d'échappement dans salle réverbérante).		70/75 phones (carlingue d'avion type « Junkers 52 »).	
	Niveau du bruit de fond transmis.	Rapport signal-bruit.	Niveau du bruit de fond transmis.	Rapport signal-bruit.
	db	db	db	db
Microphone à charbon (¹) « Solid-Bach »	0	0	0	+16
Laryngophone électromagnétique (²)	–	–	—30	+46
Microphone américain à charbon pour avion	—6	+ 6	— 6,8	+22,8
Microphone électrodynamique « S.I.F. MD-6 »	—12	+12	—14,8	+30,8
Microphone différentiel « S.I.F. MD 7 »	—21	+21	—20,8	+36,8

(¹) Le niveau de bruit de fond de cet appareil a été pris comme niveau de référence.
(²) Niveau et rapport signal-bruit cités seulement à titre documentaire, le laryngophone ne pouvant être comparé aux microphones ni pour l'intelligibilité, ni pour la commodité d'emploi.

c. Conclusions. — Il est possible, au vu des caractéristiques du précédent tableau, de choisir l'appareil le mieux adapté à chaque cas selon les conditions particulières d'emploi.

1° L'intensité des bruits ambiants dont doit être fonction l'atténuation du type d'appareil utilisé;

2° La nature des conversations échangées dont doit dépendre la netteté;

3° La disposition générale de l'installation, dont doit dépendre l'efficacité, certains types d'appareil exigeant une chaîne d'amplification importante d'un poids et d'un encombrement inadmissibles dans certaines applications.

Intensité des bruits ambiants. — Selon le principe précédemment exposé (Chap. I, § B) « Définition du milieu », une différence de niveau de 20 phones est nécessaire pour l'établissement d'une conversation; on admettra une différence de 10 phones dans les cas difficiles. Le niveau de la parole pouvant atteindre 90 phones, il est donc possible d'utiliser des microphones normaux, dans un milieu bruyant de niveau inférieur ou égal à 70 phones (atténuation nulle).

Le microphone S. I. F. MD.6 conviendra particulièrement aux milieux bruyants de niveau inférieur ou égal à 92 phones (atténuation 12 db).

Il est encore possible de converser dans un milieu bruyant d'un niveau de plus de 100 phones en utilisant un microphone S. I. F. MD.7 (atténuation 21 db).

Nature des conversations échangées. — Certaines utilisations requièrent la plus grande netteté possible, interlocuteurs se connaissant peu, parlant de questions inconnues de l'un d'eux.

Dans ce cas, l'emploi du microphone S. I. F. MD.7 est particulièrement indiqué (netteté 90 %).

Par contre, le microphone S. I. F. MD.6 convient parfaitement aux communications téléphoniques entre membres d'un équipage se transmettant des ordres ou des renseignements (netteté 75 %).

Ainsi le microphone S. I. F. MD.7 est utilisé pour équiper l'ensemble S. I. F. 545, destiné à assurer la liaison radiotéléphonique de passagers d'avions au réseau téléphonique terrestre; tandis que le microphone S. I. F. MD.6 est utilisé dans l'équipement des téléphones de bord S. I. F. 631 et 632, ainsi que des ensembles radioélectriques de

piste S. I. F. 484 pour relier les membres de l'équipage d'un avion, soit entre eux, soit aux services du sol.

Disposition générale de l'installation. — L'utilisation de ces deux types d'appareils ne peut être limitée que par leur efficacité, moins importante que celle de microphones normaux (0,2 V pour le MD.6 et 0,007 V pour le MD.7 au lieu de 3 V pour une pastille type Solid Back) et entraînant de ce fait l'emploi d'un amplificateur à lampes avec ses servitudes.

Cet amplificateur doit comporter deux étages pour le microphone S. I. F. MD.6, comme pour le laryngaphone, et trois étages pour le microphone S. I. F. MD.7.

Néanmoins, les avantages obtenus, atténuation et netteté, compensent les inconvénients de cette moindre efficacité et suffisent à justifier leur emploi dans les cas précédemment décrits.

IV. — Réalisation d'un appareillage de phonométrie destiné en particulier aux mesures des caractéristiques de microphones anti-bruits.

Les premiers essais effectués sur les microphones anti-bruits ont mis en évidence que le matériel téléphonométrique habituel ne pouvait être utilisé.

La méthode conventionnelle consiste généralement à créer à l'intérieur d'un tunnel ou d'une chambre sourde un système d'ondes planes, générées par un haut-parleur électrodynamique de dimensions normales, donc importantes par rapport à celles de l'embouchure du microphone.

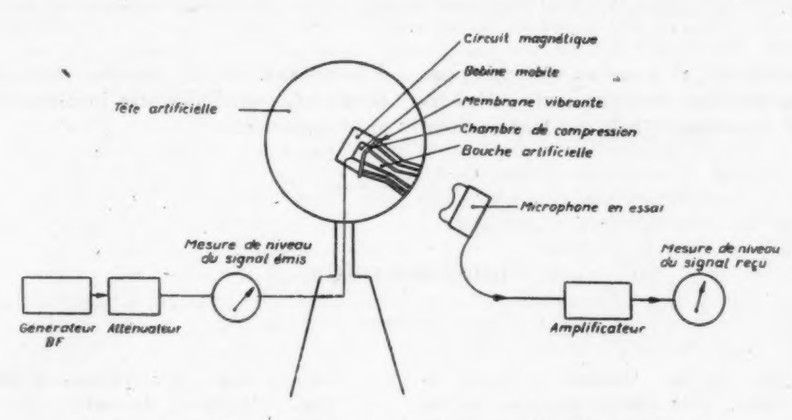


Fig. 6. — Appareillage d'essai pour microphone anti-bruit (tête artificielle).

Un microphone anti-bruit placé dans cette ambiance donne un résultat sensiblement nul, car il est influencé par cette émission sonore comme par un bruit extérieur contre lequel il est protégé par construction.

De plus, la méthode ne permet pas l'application simultanée du signal utile et de bruits parasites à leurs niveaux respectifs, nécessaire pour la mesure du rapport signal-bruit.

Il est donc indispensable de réaliser un générateur acoustique délivrant une émission sonore dirigée comparable à celle de la voix humaine, c'est-à-dire ayant la même amplitude et le même diagramme de directivité.

Ces caractéristiques sont obtenues par l'emploi d'un haut-parleur électrodynamique à chambre de compression dont l'embouchure est spécialement étudiée pour l'obtention de ce diagramme (*fig.* 6).

Il suffit de placer le microphone à essayer devant cette bouche artificielle pour qu'il se trouve dans les conditions très particulières de son utilisation.

Si de plus on réalise ce générateur dans une sphère de volume égal à celui d'une tête humaine, il est possible de procéder à des mesures de rapport signal-bruit, cette tête artificielle jouant devant le microphone le même rôle de masque que la tête de l'opérateur. L'ensemble microphone à essayer-tête artificielle, est placé, pour cela, à l'intérieur d'une chambre réverbérante dans laquelle sont installés des générateurs acoustiques reproduisant, au niveau néces-

saire, les bruits au milieu desquels les microphones doivent être utilisés (*fig.* 7).

La mise au point de cet appareillage a été effectuée en collaboration avec le Centre national d'Études

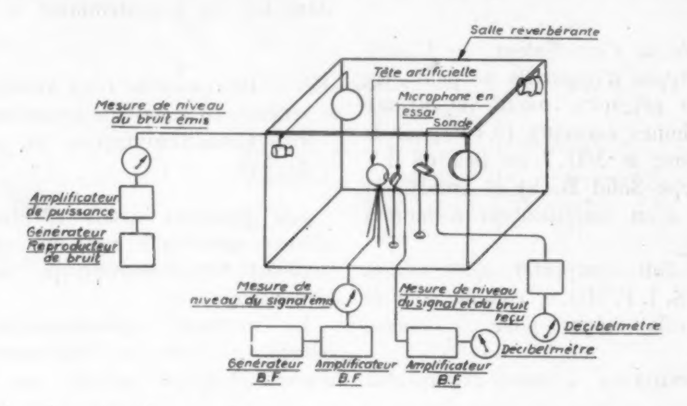


Fig. 7. — Installation d'essai de microphone anti-bruit pour la mesure du rapport signal-bruit.

des Télécommunications, et nous ne voudrions pas terminer sans exprimer nos remerciements à M. l'Ingénieur en chef Chavasse, Chef du Département d'Acoustique de ce Centre, ainsi qu'à ses collaborateurs, pour l'aide très précieuse qu'ils nous ont ainsi apportée.

BIBLIOGRAPHIE.

1. Harry F. Olson, *On the collection of Sound in reverberant rooms, with special reference to the application of the ribbon microphone* (*Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, may 1933).

2. Frank Massa, *Permissible amplitude distortion of speech in an audio reproducing system.*

3. Olson et Massa, *High quality ribbon receiver* (*Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, may 1933).

4. Olson et Carlisle, *A lapel microphone of the velocity type* (*Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, december 1934).

5. Harry F. Olson, *Line microphones* (*Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, july 1939).

6. Chavasse, *Mesures acoustiques relatives aux bancs insonorisés pour essais de moteur d'aviation* (Congrès national de l'aviation française 194?, Sous-Section 32, Rapport n° 399).

7. Janovsky, *Les communications téléphoniques dans les milieux bruyants et dans le vent* (*Siemens*, 20 janvier 1938).

ESSAI DE THÉORIE DU TUBE ÉLECTRONIQUE À PROPAGATION D'ONDE

Par J. BERNIER,

Docteur ès Sciences mathématiques,
Laboratoire de Recherches « Tubes Électroniques » de la Compagnie Générale de Télégraphie sans fil.

Sommaire. — *On considère qu'un tube amplificateur à propagation d'onde est constitué par une ligne de transmission à faible vitesse de phase (vitesse voisine de celle des électrons) avec des sources de champ uniformément réparties, ces sources étant dues à l'interaction du champ électrique en propagation et des électrons. On suppose en premier lieu que la ligne est à mode de transmission unique et l'on tient compte de son amortissement. L'onde forcée a quatre composantes dont l'une, sous certaines conditions, se propage dans le sens de mouvement des électrons avec une amplitude croissant exponentiellement et subsiste seule, pratiquement, à la sortie du tube. Le gain des T. P. O. est calculé : celui-ci croît avec le courant et la longueur de la ligne, mais ne peut croître indéfiniment sans risque d'accrochage; l'atténuation de la ligne permet de reculer la limite d'accrochage. On étudie également la bande passante des T. P. O. : celle-ci est en général une fonction décroissante du gain. Il existe une certaine analogie entre des T. P. O. et une cascade de triodes amplificatrices à résistance couplées par une ligne de Lécher. On indique en annexe les modifications que l'on doit apporter à la théorie lorsque la ligne de transmmission possède plusieurs modes de propagation, et l'on examine en particulier le cas où cette ligne est constituée par un guide d'ondes rempli d'une substance diélectrique à grande réfringence.*

Au cours d'une communication faite récemment devant la 8e Section de la Société française des Electriciens [1], R. Warnecke a fourni quelques données générales sur les principes, les caractéristiques et les possibilités du nouveau type de tube amplificateur U. H. F. dit à propagation d'onde, qui vient de faire l'objet d'une réalisation remarquable de la part des « Bell Telephone Laboratories ».

Un tube de ce genre ayant un gain de l'ordre de 33 db, soit 200 en puissance, et une bande passante particulièrement large de 800 Mc/sec (entre points à 3 db) pour une fréquence moyenne de 3600 Mc/sec est constitué (*fig.* 1) par une hélice d'une trentaine de centimètres de longueur et un faisceau électronique circulant selon l'axe de la dite hélice. L'énergie H. F. est introduite à l'extrémité côté canon de l'hélice et est recueillie, amplifiée, à l'extrémité côté collecteur d'électrons. L'hélice sert de guide d'onde à champ électrique axial à faible vitesse de phase (environ 1/12e de la vitesse de la lumière) et présente en outre une certaine atténuation. Les électrons à l'intérieur de l'hélice ne sont soumis à aucun champ électrostatique et la tension de fonctionnement (1600 V) est choisie de façon que la vitesse des électrons soit à peu

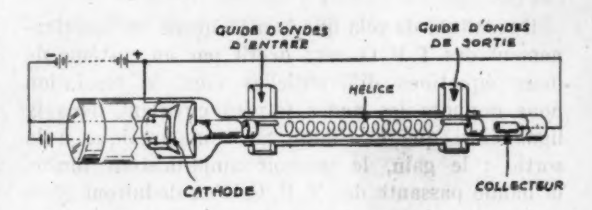


Fig. 1. — Schéma du T. P. O. à hélice, d'après J. R. Pierce.

[1] Séance du 28 novembre 1946, sous la présidence de M. Ponte.

près égale à la vitesse de phase de l'onde libre dans l'hélice.

Ainsi l'onde accompagne les électrons dans leur mouvement; inversement les électrons réagissent sur l'onde et, parmi les composantes de l'onde forcée ainsi créée, une de celles-ci se propage dans la direction du mouvement des électrons et a le caractère d'une onde à atténuation fortement négative, c'est-à-dire d'une onde dont l'amplitude croît au fur et à mesure de sa propagation.

Nous ne poursuivrons pas plus avant la description du « Travelling wave tube » ou tube électronique à propagation d'onde dont la description, tout au moins quant au type à hélice, et des indications sur le principe de fonctionnement, ont déjà été données en particulier par J. R. Pierce [1] aux États-Unis, par R. Kompfner [2] en Angleterre et par R. Warnecke [3] en France.

Notre but est de faire ici la théorie d'un concept simplifié, mais cependant assez général, de tubes à propagation d'onde, afin de mettre en évidence, aussi bien qualitativement que quantitativement, le mécanisme de l'amplification de l'énergie de U. H. F., son caractère et ses limites.

Nous considérerons donc qu'un T. P. O. est constitué par une ligne de transmission (ou guide d'onde) à faible vitesse de propagation de phase, fermée à chaque extrémité sur son impédance caractéristique, avec des sources de champ uniformément réparties, ces sources étant dues au faisceau électronique.

Nous avons donc à étudier :

1° L'action d'un champ H. F. longitudinal sur un faisceau d'électrons;

2° Le champ d'une ligne de transmission lorsqu'il y a des sources réparties;

3° Le couplage du faisceau à la ligne de transmission.

Il résultera de cela que le mécanisme de fonctionnement des T. P. O. sera décrit par un système de deux équations différentielles dont la résolution nous donnera les ondes forcées circulant dans la ligne ainsi que le champ électromagnétique à la sortie : le gain, le pouvoir amplificateur limite, la bande passante des T. P. O. s'en déduiront alors aisément. A titre d'exemple, nous avons calculé le gain du T. P. O. décrit par J. R. Pierce. En annexe, nous déterminons les grandeurs caractéristiques (impédance de couplage) des T. P. O. dont la ligne possède plusieurs modes de transmission, tel un guide d'ondes rempli de diélectrique à grande réfringence.

Principales notations.

V_0, v_0, tension d'accélération et vitesse moyenne des électrons;

i_0, σi_0, densité et intensité de la partie continue du courant du faisceau, de section droite σ;

$\sigma i(z)$, partie non continue du courant du faisceau;

ω, pulsation;

l, longueur de la ligne de transmission;

v, vitesse de phase de l'onde libre dans la ligne de transmission;

$k = \frac{\omega}{v}$, $k_0 = \frac{\omega}{v_0}$, grandeurs attachées à l'onde libre et aux électrons;

$\delta = \frac{v_0 - v}{v}$, désaccord relatif de vitesse entre l'onde libre et les électrons;

γ, constante d'atténuation de la ligne;

$\beta = \gamma + jk = jk\, e^{-j\psi}$, constante de propagation de l'onde libre;

$\Gamma_i = \beta X_i$, $i = 1, 2, 3, 4$, constantes de propagation des quatre composantes de l'onde forcée;

$X_1 = 1 - s_1$, $X_2 = -1 + s_2$, $X_3 = -1 + pe^{j\theta}$, $X_4 = -1 + pe^{-j\theta}$, racines de l'équation caractéristique;

A_i, B_i, coefficients d'amplitudes des quatre composantes du courant et de l'onde forcée;

$Z = |Z|\, e^{j\varphi}$, impédance de couplage du faisceau électronique à la ligne;

$Z_0 = \frac{V_0}{\sigma i_0}$, impédance du faisceau;

$\alpha = \frac{(1-\delta)Z}{2 Z_0}$, p, θ, paramètres intervenant dans l'expression du gain $\left[\text{si } \delta = 0,\ p = \left(\frac{|\alpha|}{2}\right)^{\frac{1}{3}} e^{j\frac{\varphi}{3}} \text{ et } \theta = \frac{2\pi}{3}\right]$;

$G = G_1 - G_2 - G_3$, gain en puissance de l'amplificateur, exprimé en décibels;

G_2, atténuation totale de la ligne de transmission, en décibels.

1. Action d'un champ H. F. longitudinal sur un faisceau électronique.

Pour établir la relation qui existe entre le courant modulé d'un faisceau électronique et le champ électrique H. F. longitudinal qui crée cette modulation de courant, nous supposerons que les signaux sont faibles (approximation du 1er ordre), que le faisceau reste parallèle, c'est-à-dire que le phénomène puisse être décrit à l'aide d'une seule dimension géométrique, et que la vitesse moyene v_0 des électrons reste constante.

Soit l'équation de mouvement

$$\frac{dv}{dt} = \eta E(z)\, e^{j\omega t} \qquad \left(\eta = \frac{e}{m}\right) \tag{1}$$

et l'équation de conservation de l'électricité

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial z} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0. \tag{2}$$

Posons

$$\rho = \rho_0 + \tilde{\rho}\, e^{j\omega t}, \qquad v = v_0 + \tilde{v}\, e^{j\omega t};$$

$$\rho v = i_0 + \tilde{i} \quad \text{avec} \quad \tilde{i} = i(z)\, e^{j\omega t}.$$

Dans (1), $\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}$ est la dérivée par rapport au temps en suivant la particule, c'est-à-dire que

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} = v_0 \frac{\partial}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial t}.$$

Or v_0 étant indépendant de z et de t par hypothèse, l'équation (1) se transforme, après suppression du facteur $e^{j\omega t}$, en

(3) $$\frac{\partial \tilde{v}}{\partial z} v_0 + j\omega \tilde{v} = \eta E(z).$$

De même (2) donne

(4) $$\frac{\partial i}{\partial z} + j\omega\tilde{\rho} = 0$$

avec

(5) $$i = \rho_0 \tilde{v} + v_0 \tilde{\rho} \qquad \text{(approximation des petits signaux).}$$

De ces trois équations éliminons $\tilde{\rho}$ et $\tilde{v}$ par dérivation et substitution afin d'obtenir une équation en $i(z)$: il vient, tous calculs faits,

$$\frac{\partial^2 i}{\partial z^2} + 2j\omega \frac{\partial i}{\partial z} - \frac{\omega^2}{v_0^2} i = j\omega \frac{\eta\rho_0}{v_0^2} E(z).$$

Cette relation peut s'écrire d'une façon légèrement différente en remarquant, d'une part, que l'on peut remplacer $\frac{\partial}{\partial z}$ par $\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}z}$ puisque i ne dépend que de z par hypothèse, et que, d'autre part,

$$\frac{\omega\eta\rho_0}{v_0^2} = \frac{\omega}{v_0} \frac{i_0}{2V_0},$$

où V_0 est la vitesse moyenne du faisceau exprimée en électron-volts. Posons

$$k_0 = \frac{\omega}{v_0}, \qquad Z_0 = \frac{V_0}{\sigma i_0},$$

où Z_0 est l'impédance du faisceau électronique et σ l'aire de sa section droite, il vient

(6) $$\frac{\mathrm{d}^2 i}{\mathrm{d}z^2} + 2jk_0 \frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}z} - k_0^2 i = \frac{jk_0}{2\sigma Z_0} E(z)$$

qui est la première des équations différentielles cherchées décrivant le mécanisme du T. P. O.

II. Champ dans une ligne de transmission avec sources réparties.

On supposera que la ligne est fermée à chaque extrémité sur son impédance caractéristique, qui peut d'ailleurs être complexe si la ligne présente une atténuation notable.

Soit γ le facteur d'atténuation, v la vitesse de phase de l'onde libre, l la longueur de la ligne (*fig.* 2).

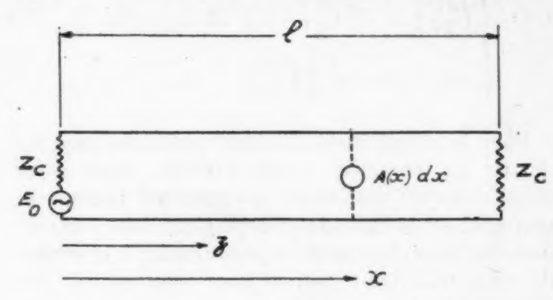


Fig. 2.

Posons

$$k = \frac{\omega}{v}, \qquad \beta = \gamma + jk.$$

D'une source unité placée en x sur la ligne parviendra en un point z une onde $\frac{1}{2} e^{-\beta(z-x)}$ se propageant vers la droite si z est à droite de x, et une onde $\frac{1}{2} e^{\beta(z-x)}$ se propageant vers la gauche si z est à gauche de x.

Inversement, si $A(x)\,\mathrm{d}x$ est l'intensité de la source élémentaire située en x et E_0 le champ d'excitation de la ligne à l'entrée, le champ $E(z)$ en un point z résultera de la superposition :

a. Du champ E_0 se propageant vers la droite, soit $E_0 e^{-\beta z}$;

b. Du champ émanant de toutes les sources $A(x)\,\mathrm{d}x$ à gauche de z et se propageant vers la droite, soit

$$\frac{1}{2}\int_0^{x=z} A(x)\, e^{-\beta(z-x)}\, \mathrm{d}x;$$

c. Du champ émanant de toutes les sources $A(x)\,\mathrm{d}x$ à droite de z et se propageant vers la gauche, soit

$$\frac{1}{2}\int_{x=z}^{l} A(x)\, e^{\beta(z-x)}\, \mathrm{d}x,$$

d'où

(8) $$E(z) = E_0\, e^{-\beta z} + \frac{1}{2}\int_0^z A(x)\, e^{-\beta(z-x)}\, \mathrm{d}x + \frac{1}{2}\int_z^l A(x)\, e^{\beta(z-x)}\, \mathrm{d}x.$$

En dérivant deux fois, on constate que cette équation intégrale a pour solution la solution de l'équation différentielle

(9) $$\frac{\mathrm{d}^2 E}{\mathrm{d}z^2} - \beta^2 E = -\beta A(z)$$

qui est relative aux conditions initiales

$$(10)\quad \begin{cases} E(0) = E_0 + \dfrac{1}{2}\displaystyle\int_0^l A(x)\, e^{-\beta x}\,\mathrm{d}x, \\ \left(\dfrac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}z}\right)_0 = -\beta E_0 + \dfrac{1}{2}\beta \displaystyle\int_0^l A(x)\, e^{-\beta x}\,\mathrm{d}x, \\ \text{soit} \quad E(0) - \dfrac{1}{\beta}\left(\dfrac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}z}\right)_0 = 2E_0. \end{cases}$$

Pour la simplicité de l'exposé ainsi que pour lui donner un caractère moins abstrait, nous avons supposé qu'un seul mode de vibration pouvait se propager sur la ligne de transmission; dans l'annexe nous indiquons comment on peut modifier le processus de dérivation des équations pour tenir compte des différents modes, éventuellement possibles, de propagation dans la ligne.

III. Couplage du faisceau et de la ligne.

Nous supposerons que l'intensité $A(z)$ de la source produite par le faisceau est proportionnelle à l'intensité du faisceau et, d'une manière plus précise, nous poserons

$$A(z) = -k^2 Z\sigma i(z),$$

où Z a les dimensions d'une impédance, « l'impédance de couplage du faisceau » [1].

La majeure partie des développements qui vont suivre est valable pour Z complexe, mais nous examinerons particulièrement le cas où Z est réel et positif. Cette hypothèse est justifiée par les calculs faits en annexe où nous explicitons la valeur de Z dans le cas où le circuit est un guide d'ondes, au sens ordinaire du mot, rempli d'un diélectrique à pouvoir inducteur spécifique élevé pour diminuer dans des proportions convenables la vitesse de phase.

Ainsi, d'après ce qui précède, le mécanisme de fonctionnement des T. P. O. est décrit par les solutions du système de deux équations différentielles

$$(11)\quad \begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}^2 i}{\mathrm{d}z^2} + 2jk_0\dfrac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}z} - k_0^2 i = \dfrac{jk_0}{2\sigma Z_0} E(z), \\ \dfrac{\mathrm{d}^2 E}{\mathrm{d}z^2} - \beta^2 E = \beta k^2 Z\sigma i(z). \end{cases}$$

solutions qui doivent satisfaire en outre aux conditions initiales (10) pour E et aux conditions initiales suivantes pour i [2] :

$$(12)\qquad i(0) = 0 \quad \text{et} \quad \left(\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}z}\right)_0 = 0.$$

Résolution du système. — Les solutions de (11) sont de la forme

$$(13)\qquad i(z) = \sum_1^4 A_i e^{\Gamma_i z}, \qquad E(z) = \sum_1^4 B_i e^{\Gamma_i z}$$

où les Γ_i sont les racines de l'équation caractéristique

$$(14)\qquad \begin{vmatrix} (\Gamma + jk_0)^2 & \dfrac{jk_0}{2Z_0\sigma} \\ \beta k^2 Z\sigma & \Gamma^2 - \beta^2 \end{vmatrix} = 0.$$

D'autre part, les A_i et B_i sont reliés par

$$(15)\qquad A_i = \frac{\Gamma_i^2 - \beta^2}{\beta k^2 Z\sigma} B_i$$

et les conditions initiales (10) et (12) imposent en outre

$$(16)\quad \begin{cases} B_1 + B_2 + B_3 + B_4 \\ \qquad = E_0 - \dfrac{k^2 Z\sigma}{2}\displaystyle\int_0^l \sum_1^4 A_i e^{(\Gamma_i - \beta)x}\,\mathrm{d}x, \\ -\dfrac{1}{\beta}[\Gamma_1 B_1 + \Gamma_2 B_2 + \Gamma_3 B_3 + \Gamma_4 B_4] \\ \qquad = 2E_0 - [B_1 + B_2 + B_3 + B_4], \\ \qquad A_1 + A_2 + A_3 + A_4 = 0, \\ \Gamma_1 A_1 + \Gamma_2 A_2 + \Gamma_3 A_3 + \Gamma_4 A_4 = 0. \end{cases}$$

Posons

$$(17)\quad \begin{cases} \Gamma = \beta X, \qquad \dfrac{jk_0}{\beta} = 1 - \delta, \\ \dfrac{jk_0 k^2}{\beta^3}\,\dfrac{Z}{2Z_0} = -\alpha, \qquad \beta l = \lambda. \end{cases}$$

L'équation caractéristique devient

$$(18)\qquad (X + 1 - \delta)^2 (X^2 - 1) = -\alpha$$

et le système (16), compte tenu de (15), devient

---

[1] Le coefficient k^2 n'a été introduit ici que pour permettre d'attribuer à Z les dimensions d'une impédance et aussi d'amener plus loin une légère simplification d'écriture.

[2] On a en effet :

$$\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}z} + j\omega\tilde{\rho} = 0, \qquad i = \rho_0\tilde{v} + v_0\tilde{\rho}.$$

Au point $z = 0$, $i = 0$ et $\tilde{v} = 0$, d'où

$$\tilde{\rho} = 0 \quad \text{et} \quad \left(\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}z}\right)_0 = 0.$$

après quelques arrangements,

$$
(19)\quad \left\{
\begin{aligned}
&\sum_1^4 (X_i - 1)B_i = -2E_0,\\
&\sum_1^4 (X_i^2 - 1)B_i = 0,\\
&\sum_1^4 X_i(X_i^2 - 1)B_i = 0,\\
&\sum_1^4 (X_i + 1)\,e^{X_i h}B_i = 0.
\end{aligned}
\right.
$$

Remarques. — 1° β est presque imaginaire pur. En effet, $\beta = \gamma + jk$ et la vitesse de phase v de l'onde libre étant notablement plus petite que la vitesse de la lumière, $k = \frac{\omega}{v}$ est relativement grand; ainsi pour le tube décrit par J. R. Pierce, $\gamma = 0,127$, $k = 9,3$, d'où $\frac{k}{\gamma} = 73$. Il s'ensuit que pratiquement δ est réel, et

$$
(20)\qquad \delta \sim \frac{k - k_0}{k} = \frac{v_0 - v}{v}.
$$

Nous aurons à étudier avec quelques détails le cas $\delta = 0$ ($v_0 = v$) qui correspond à un fonctionnement optimum des T. P. O., mais les formules que nous établirons seront suffisamment générales pour nous permettre de voir l'influence de δ sur le gain.

2° D'après (17) on a très sensiblement

$$
(21)\qquad \alpha \sim (1 - \delta)\frac{Z}{2Z_0}.
$$

α est une mesure du rapport de l'impédance de couplage à l'impédance du faisceau, et si Z est réel et positif, α est également réel et positif. Pratiquement, pour éviter « l'accrochage » du tube amplificateur, ainsi que nous l'indiquerons au paragraphe VII, α doit être très petit, de l'ordre de 10^{-4} par exemple.

IV. Propagation des ondes. Résolution de l'équation caractéristique.

L'équation caractéristique (18) étant du quatrième degré, elle a quatre racines X_1, X_2, X_3, X_4 auxquelles correspondent les quatre constantes de propagation Γ_1, Γ_2, Γ_3 et Γ_4 : c'est donc par l'étude de l'équation (18) que nous pourrons mettre en évidence les ondes à « atténuation négative » caractéristiques des T. P. O.

Remarquons d'ailleurs que Γ étant peu différent de jkX, ce sont les racines à partie imaginaire négative qui donneront lieu à des constantes Γ à partie réelle positive, c'est-à-dire à des ondes se propageant en s'amplifiant.

Considérons la courbe $Y = (X + 1 - \delta)^2(X^2 - 1)$ (*fig.* 3); quel que soit δ elle coupe l'axe des X aux

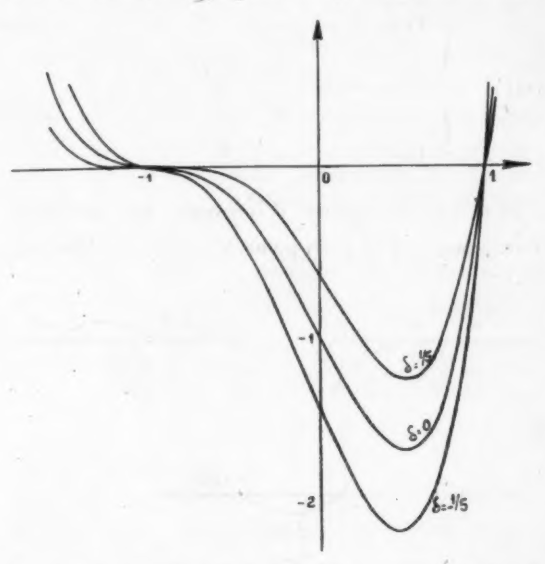


Fig. 3. — Courbe $Y = (X + 1 - \delta)^2(X^2 - 1)$ pour $\delta = 0$, $\delta = -\frac{1}{5}$ et $\delta = +\frac{1}{5}$.

points $+1$ et -1; en $X = 1$ la courbe ayant une pente égale à $2(2 - \delta)^2$, l'équation $Y = -\alpha$ a, dans ce voisinage et pour de faibles valeurs de α, une racine

$$
(22)\qquad X_1 = 1 - \frac{\alpha}{2(2 - \delta)^2} \sim 1 - \frac{\alpha}{8}.
$$

Dans le voisinage de $X = -1$ par contre, la courbe Y a très sensiblement pour équation

$$
Y = -2(X + 1)(X + 1 - \delta)^2.
$$

Trois cas sont alors à considérer :

1° $\delta = 0$, la courbe a un point d'inflexion horizontal en $X = -1$ (*fig.* 4 *a*) et les trois racines X_2, X_3, X_4 sont les racines de $(X + 1)^3 = \frac{\alpha}{2}$. Posons $\alpha = |\alpha|\,e^{j\varphi}$, alors

$$
(23)\quad \left\{
\begin{aligned}
X_2 &= -1 + \left|\frac{\alpha}{2}\right|^{\frac{1}{3}} e^{j\frac{\varphi}{3}},\\
X_3 &= -1 + \left|\frac{\alpha}{2}\right|^{\frac{1}{3}} e^{j\left(\frac{2\pi}{3} + \frac{\varphi}{3}\right)},\\
X_4 &= -1 + \left|\frac{\alpha}{2}\right|^{\frac{1}{3}} e^{j\left(-\frac{2\pi}{3} + \frac{\varphi}{3}\right)}.
\end{aligned}
\right.
$$

2° $\delta < 0$, la courbe Y est tangente à l'axe des X en $X = -1 + \delta$ à gauche de $X = -1$ (*fig.* 4 *b*). Tant que $\frac{|\alpha|^2}{4\delta^4}$ est négligeable par rapport à l'unité on trouve que

$$(24)\quad \begin{cases} X_2 \sim -1 + \dfrac{\alpha}{2\delta^2}, \\ X_3 \sim -1 + \delta + \left|\dfrac{\alpha}{2\delta}\right|^{\frac{1}{2}} e^{j\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\varphi}{2}\right)}, \\ X_4 \sim -1 + \delta + \left|\dfrac{\alpha}{2\delta}\right|^{\frac{1}{2}} e^{j\left(-\frac{\pi}{2} + \frac{\varphi}{2}\right)}. \end{cases}$$

3° $\delta > 0$, la courbe Y présente un minimum d'ordonnée $-\left(\frac{2\delta}{3}\right)^3$ au point $X = -1 + \frac{\delta}{3}$ (*fig.* 4 *c*).

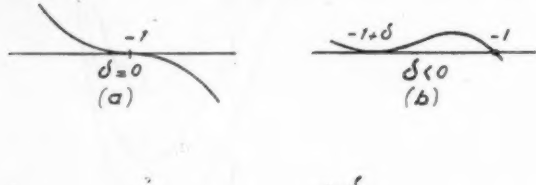


Fig. 4.

Si α est réel il ne peut y avoir de racines imaginaires, donc des ondes à atténuation négative, que si $\alpha \geq \left(\frac{2\delta}{3}\right)^3$.

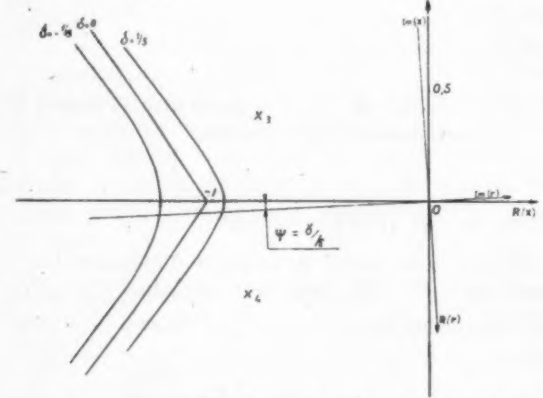


Fig. 5. — Lieu des affixes des racines X_3 et X_4 de l'équation caractéristique dans le plan complexe pour α réel et $\delta = 0$, $\delta = -\frac{1}{5}$ et $\delta = +\frac{1}{5}$.

A titre indicatif, on a représenté en figure 5 le lieu des affixes des racines X_3 et X_4 dans le plan complexe pour $\delta = 0$ et $\delta = \pm\frac{1}{5}$ avec α, réel, variable.

Ainsi que nous le montrerons au paragraphe VII, seuls les points au voisinage de l'axe réel sont susceptibles de nous intéresser. Comme les constantes de propagation s'obtiennent en faisant le produit de X par $\gamma + jk$, en tournant les axes de la figure 5 de $\frac{3\pi}{2}$ + arc tang $\frac{\gamma}{k}$ et en prenant k pour unité, on peut lire directement sur la figure 5 les affixes Γ_3 et Γ_4 des constantes de propagation. Les points dans le quatrième quadrant, où la partie réelle de Γ_4 est positive et où la partie imaginaire est négative, caractérisent une onde se propageant vers la droite en s'amplifiant; on se rend aisément compte qu'une telle onde ne peut exister que si α est supérieur à une certaine valeur minimum (fonction de δ), qui est d'autant plus grande que $\frac{\gamma}{k}$ est plus grand, c'est-à-dire, en particulier, que l'atténuation γ de la ligne de transmission est plus élevée.

Introduisons les notations

$$X_1 = 1 - s_1, \qquad X_3 = -1 + p\, e^{j\theta},$$
$$X_2 = -1 + s_2, \qquad X_4 = -1 + p\, e^{-j\theta},$$

en particulier lorsque $\delta = 0$

$$(25)\qquad s_1 \sim \frac{\alpha}{8}, \qquad s_2 = p = \left|\frac{\alpha}{2}\right|^{\frac{1}{3}} e^{j\frac{\varphi}{3}}, \qquad \theta = \frac{2\pi}{3}.$$

Supposons maintenant un instant pour simplifier, et ce qui doit être assez proche de la réalité ainsi que nous le montrerons dans l'Annexe, que l'impédance de couplage Z soit réelle et positive, donc que α soit réel ($\varphi = 0$). Nous pouvons alors aisément calculer les constantes de propagation par la formule $\Gamma = (\gamma + jk)X$; leurs expressions sont indiquées dans le Tableau I où nous avons mentionné, en outre, leurs valeurs dans le cas particulier fort important où $\delta = 0$, ainsi que le caractère des ondes correspondantes.

De l'examen de ce tableau il ressort que l'onde forcée excitée par le faisceau électronique circulant dans la ligne de transmission à une vitesse voisine de celle de l'onde libre a un caractère assez différent de cette dernière; cette onde forcée se déforme en se propageant; elle se décompose en quatre composantes de vitesses différentes [l'onde de retour Γ_1 a une vitesse semblable à celle de l'onde libre tandis que les trois ondes d'aller Γ_2, Γ_3, Γ_4 ont des vitesses, soit nettement plus grandes (Γ_2), soit nettement plus faibles (Γ_3, Γ_4)] et dont les amplitudes vont soit en s'atténuant normalement (Γ_1, Γ_2), soit en s'atténuant fortement (Γ_3), soit

Tableau I.

	Z, α réels.		Caractère des ondes.
	$\delta \neq 0$, $\frac{\pi}{2} < \theta < \pi$.	$\delta = 0$, $\theta = \frac{2\pi}{3}$.	
Γ_1.....	$(1 - s_1)(\gamma + jk)$	$(1 - s_1)(\gamma + jk)$	Onde se propageant vers la gauche en s'atténuant (atténuation de l'ordre de γ; coefficient d'amplitude B_1 très faible)
Γ_2.....	$(-1 + s_2)(\gamma + jk)$	$\left[-1 + \left(\frac{\alpha}{2}\right)^{\frac{1}{3}}\right](\gamma + jk)$	Onde se propageant vers la droite en s'atténuant (atténuation de l'ordre de γ; vitesse de propagation nettement plus élevée que celle de l'onde libre et que celle des électrons; coefficient d'amplitude $B_2 \sim \frac{E_0}{3}$)
Γ_3.....	$(-1 + p\cos\theta)\gamma - pk\sin\theta$	$-\left[1 + \frac{1}{2}\left(\frac{\alpha}{2}\right)^{\frac{1}{3}}\right]\gamma - k\left(\frac{\alpha}{2}\right)^{\frac{1}{3}}\frac{\sqrt{3}}{2}$	Onde fortement atténuée se propageant vers la droite (vitesse de propagation nettement plus faible que la vitesse de l'onde libre; coefficient d'amplitude $B_3 \sim \frac{E_0}{3}$)
	$-j[(1 - p\cos\theta)k - \gamma p \sin\theta]$	$-j\left\{\left[1 + \frac{1}{2}\left(\frac{\alpha}{2}\right)^{\frac{1}{3}}\right]k - \gamma\left(\frac{\alpha}{2}\right)^{\frac{1}{3}}\frac{\sqrt{3}}{2}\right\}$	
Γ_4.....	$(-1 + p\cos\theta)\gamma + pk\sin\theta$	$-\left[1 + \frac{1}{2}\left(\frac{\alpha}{2}\right)^{\frac{1}{3}}\right]\gamma + k\left(\frac{\alpha}{2}\right)^{\frac{1}{3}}\frac{\sqrt{3}}{2}$	Onde fortement amplifiée, se propageant vers la droite (vitesse de propagation nettement plus faible que celle de l'onde libre et que celle des électrons; coefficient d'amplitude $B_4 \sim \frac{E_0}{3}$)
	$-j[(1 - p\cos\theta)k + p\gamma \sin\theta]$	$-j\left\{\left[1 + \frac{1}{2}\left(\frac{\alpha}{2}\right)^{\frac{1}{3}}\right]k + \gamma\left(\frac{\alpha}{2}\right)^{\frac{1}{3}}\frac{\sqrt{3}}{2}\right\}$	

encore en s'amplifiant fortement (Γ_4). C'est cette dernière composante qui nous intéresse plus particulièrement, subsistant pratiquement seule après un parcours suffisant.

V. **Coefficients d'amplitude.**

Maintenant que nous avons mis en évidence l'existence d'une onde à forte atténuation négative, il reste à examiner l'amplitude de cette onde, c'est-à-dire à résoudre le système (19).

De l'examen des différents coefficients des inconnues B_i, et plus particulièrement de ceux de la dernière équation, on constate que B_1 doit être très petit par rapport à B_2, B_3, B_4. Il s'ensuit qu'on ne commettra pas une grosse erreur en faisant $B_1 = 0$ dans les trois premières équations (ce qui nous donne un système à trois équations et trois inconnues B_2, B_3, B_4), quitte à vérifier si la valeur de B_1 que l'on trouve alors en portant dans la dernière équation les solutions approchées B_2, B_3, B_4 ainsi trouvées est suffisamment petite. Ce point est examiné au paragraphe suivant : on constate que l'on peut s'en tenir ainsi à la première approximation si γ est suffisamment grand, c'est-à-dire si l'atténuation totale du circuit est élevée. C'est ce que nous supposerons dans la suite, sinon il y aurait lieu de poursuivre la résolution par approxi-

mations successives. Ainsi, avec ces hypothèses, on trouve

$$(26)\quad \left\{\begin{aligned} B_2 &= -2E_0\frac{(X_3+1)(X_4+1)}{(X_2-1)(X_2-X_3)(X_2-X_4)},\\ B_3 &= -2E_0\frac{(X_4+1)(X_2+1)}{(X_3-1)(X_3-X_4)(X_3-X_2)},\\ B_4 &= -2E_0\frac{(X_2+1)(X_3+1)}{(X_4-1)(X_4-X_2)(X_4-X_3)};\end{aligned}\right.$$

soit encore

$$B_2 = 2E_0\frac{p^2}{(2-s_2)(s_2^2+p^2-2s_2p\cos\theta)},$$

$$B_3 = \frac{jE_0}{\sin\theta}\,\frac{e^{-j\theta}}{(2-p\,e^{j\theta})\left(1-\dfrac{p}{s_2}e^{j\theta}\right)},$$

$$B_4 = -\frac{jE_0}{\sin\theta}\,\frac{e^{j\theta}}{(2-p\,e^{-j\theta})\left(1-\dfrac{p}{s_2}e^{-j\theta}\right)}.$$

Dans le cas particulier où $\delta = 0$ (électrons à la même vitesse que l'onde libre)

$$\theta = \frac{2\pi}{3},\qquad s_2 = p = \left|\frac{\alpha}{2}\right|^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{Z}{4Z_0}\right)^{\frac{1}{3}} = \left[\frac{|Z|}{4Z_0}\right]^{\frac{1}{3}} e^{j\frac{\varphi}{3}}$$

et

$$(27)\quad \left\{\begin{aligned} B_2 &= \frac{2}{3}\,\frac{E_0}{2-p},\\ B_3 &= \frac{E_0}{3}\,\frac{4+p+jp\sqrt{3}}{4+2p+p^2},\\ B_4 &= \frac{E_0}{3}\,\frac{4+p-jp\sqrt{3}}{4+2p+p^2}.\end{aligned}\right.$$

En général $|p|$ est négligeable devant l'unité, si bien que

$$(28)\qquad B_2 \sim B_3 \sim B_4 \sim \frac{E_0}{3}.$$

VI. Gain de l'amplificateur.

Ce qui nous intéresse pour l'utilisation, c'est le champ à la sortie de l'amplificateur, soit

$$E(l) = B_1\,e^{\Gamma_1 l} + B_2\,e^{\Gamma_2 l} + B_3\,e^{\Gamma_3 l} + B_4\,e^{\Gamma_4 l}$$

et plus exactement encore le rapport entre la partie du champ à la sortie qui se propage vers la droite et le champ d'excitation E_0, soit pratiquement,

$$(29)\qquad \frac{E_s}{E_0} = \frac{B_4}{E_0}\,e^{\Gamma_4 l}.$$

Le gain en puissance est égal au carré du module de $\frac{E_s}{E_0}$: exprimé en décibels, il sera défini par

$$G = 20\log_{10}\left|\frac{E_s}{E_0}\right| \quad \text{db}.$$

On constate que G peut se mettre sous la forme d'une somme algébrique de trois termes

$$G = G_1 - G_2 - G_3 \quad \text{db}$$

avec

$$(30)\quad \left\{\begin{aligned} G_1 &= 8{,}68\,l\,\mathcal{R}(X_4+1)(\gamma+jk),\\ G_2 &= 8{,}68\,\gamma_i\,l,\\ G_3 &= 20\log_{10}\left|\frac{E_0}{B_4}\right| = 20\log_{10}\frac{(X_4-1)(X_4-X_2)(X_4-X_3)}{2(X_2+1)(X_3+1)}\end{aligned}\right.$$

où les X_i sont donnés par les formules du paragraphe IV, et où $\mathcal{R}$ signifie « partie réelle de... ».

Dans le cas particulier où $\delta = 0$ *et Z est complexe*, d'après (23) et (28)

$$G_1 = 8{,}68\,|p|\,kl\cos\left(\frac{\pi}{6}-\frac{\varphi}{3}+\psi\right) \quad \text{db},$$

$$G_3 = 9{,}6 \quad \text{db},$$

où

$$\psi = \frac{\gamma}{k}\ \text{radian},\qquad \varphi = \arg Z \qquad \text{et} \qquad |p| = \left[\frac{|Z|}{4Z_0}\right]^{\frac{1}{3}}.$$

Si Z est réel et δ *quelconque*, on a

$$G_1 = 8{,}68\,kpl\sin(\theta+\psi) \quad \text{db},$$

$$G_3 = 10\log_{10}(4-4p\cos\theta+p^2)\left(1-2\frac{p}{s_2}\cos\theta+\frac{p^2}{s_2^2}\right)\sin^2\theta \ \text{db}.$$

Enfin *si Z est réel et* δ *nul*, la formule du gain est (en négligeant ψ dans le cosinus)

$$(31)\qquad G = -9{,}6 - 8{,}68\,\gamma_i l + 8{,}68\,pkl\,\frac{\sqrt{3}}{2} \quad \text{db}.$$

Ainsi dans la formule générale du gain des tubes amplificateurs à propagation d'onde

$$G = G_1 - G_2 - G_3 \quad \text{db},$$

G_1 apporte seul une contribution positive au gain : il est proportionnel à la longueur l de la ligne de transmission, est fonction de la fréquence et croît avec le courant comme $i_0^{\frac{1}{3}}$;

G_2 est l'atténuation totale de la ligne de transmission;

G_3 est en rapport avec le fait que le coefficient d'amplitude B_4 de l'onde croissante est plus petit que E_0; si les électrons vont à la même vitesse que l'onde libre, G_3 est constant et vaut 9,6 db. Des calculs, qui ne sont pas reproduits ici, ont montré que lorsque Z est réel, G_3 reste pratiquement indépendant de i_0, de l et de ω, mais varie légèrement avec δ : pour $\delta = -\frac{1}{5}$ on trouve $G_3 = 12{,}5$ db et pour $\delta = +\frac{1}{5}$, $G_3 = 13{,}5$ db.

Exemple numérique. — A titre d'exemple, considérons le tube à propagation d'onde du type à

hélice décrit par J. R. Pierce [1]. Les constantes de ce tube sont :

Tension V_0 de fonctionnement (V)......	1670
Fréquence moyenne (Mc : s)............	3600
Longueur l de l'hélice (cm)............	30
Atténuation du circuit (db)............	33

On en déduit :

$$v_0 = 2{,}43 \cdot 10^9 \text{ cm : s}, \qquad \frac{c}{v} = 12{,}3, \qquad k = \frac{\omega}{v} = 9{,}3,$$

$$\gamma = 0{,}127 \qquad \left(\frac{\gamma}{k} = \frac{1}{73}\right).$$

En figure 6 nous avons tracé pour ce tube la courbe de gain théorique en fonction de $\alpha = \frac{Z}{2Z_0}$ et en supposant Z réel et δ nul, c'est-à-dire que

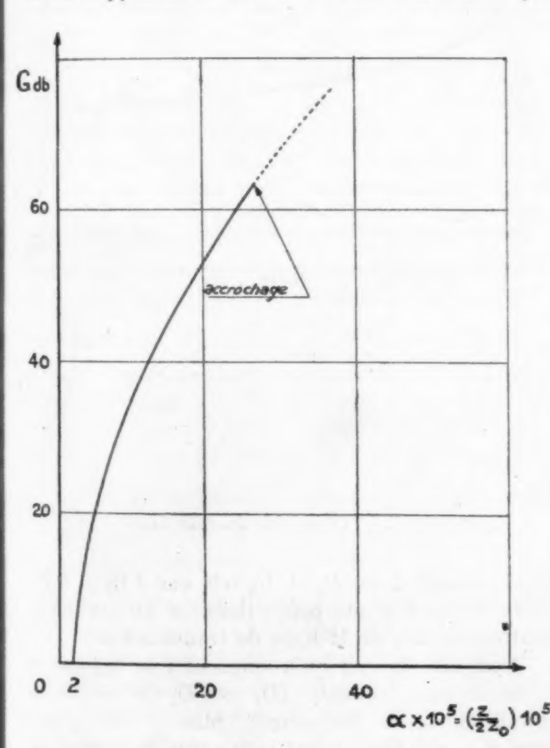


Fig. 6. — Exemple de variation du gain théorique, en décibels, d'un T. P. O. en fonction du paramètre α et pour $\delta = 0$ (valeurs numériques tirées des constantes du tube décrit par J. R. Pierce).

les électrons aillent à la même vitesse que l'onde libre [formule (31)]. On constate que le gain ne devient positif qu'à partir de $\alpha = 2 \times 10^{-5}$, puis croît très rapidement et atteint par exemple la valeur de 39 db pour $\alpha = 10^{-4}$, c'est-à-dire pour un courant cinq fois plus élevé que le courant de démarrage.

Validité des résultats. — Pour la résolution du système (19) nous avons négligé B_1 dans les trois premières équations, ce qui nous a conduit aux expressions (25) de B_2, B_3 et B_4 et à l'expression (30) du gain. Or B_1 s'obtient, selon cette méthode, à partir de la quatrième équation (19) qui, étant donnée la faible valeur des coefficients de B_2 et B_3, peut pratiquement s'écrire

$$(X_1 + 1)\, e^{\chi_1 l} B_1 + (X_4 + 1)\, e^{\chi_4 l} B_4 = 0.$$

Mais

$$X_1 \sim 1, \qquad X_4 + 1 = p\, e^{-j\theta}, \qquad B_4\, e^{\chi_4 l} = E_s,$$

d'où

$$\frac{B_1}{E_0} \sim -\frac{1}{2} p\, e^{-j(\theta + kl)} \frac{E_s}{E_0} e^{-\gamma l}. \tag{32}$$

Ainsi $\frac{B_1}{E_0}$ cesse d'être négligeable lorsque $\left|\frac{E_s}{E_0}\right| e^{-\gamma l}$ est plus grand que l'unité, c'est-à-dire lorsque le gain, en décibels, est plus élevé que l'atténuation du circuit. On peut se demander si les valeurs indiquées de B_2, B_3 et B_4 ainsi que l'expression du gain sont encore suffisamment correctes dans ces conditions. Or si, pour une deuxième approximation de calcul, on écrit dans le deuxième membre des trois premières équations (19) les termes supposés connus contenant B_1, les coefficients de ceux-ci sont respectivement

$$-(X_1 - 1) \sim \frac{\alpha}{8}, \quad -(X_1^2 - 1) \sim \frac{\alpha}{4}, \quad -X_1(X_1^2 - 1) \sim \frac{\alpha}{4},$$

tandis que les coefficients des inconnues B_2, B_3, B_4 sont de l'ordre de $p \sim \left(\frac{\alpha}{2}\right)^{\frac{1}{3}}$. Mais pour d'aussi relativement grandes valeurs de α que $2 \cdot 10^{-3}$ par exemple, $\frac{\alpha}{4}$ ne vaut que $0{,}5 \cdot 10^{-3}$ tandis que $p \sim 10^{-1}$, ce qui fait que les valeurs indiquées par les formules (25) pour B_2, B_3, B_4 restent encore une bonne approximation.

VII. Gain limite.

Le fait que B_1, c'est-à-dire l'intensité de la composante de retour Γ_1 de l'onde excitée, croisse avec le gain entraîne une limite du pouvoir amplificateur des tubes à propagation d'onde. Comme dans tout amplificateur à réaction, il y aura « accrochage » dès que l'intensité de celle-ci devient suffisante pour neutraliser l'excitation.

D'une manière plus précise, le champ à l'entrée

de la ligne de transmission est donné par les relations (10) et (16) à savoir [1]

$$E(0) = E_0 + \frac{1}{2}\int_0^l A(x)\,e^{-\beta x}\,\mathrm{d}x = B_1 + B_2 + B_3 + \dot{B}_4.$$

Il y aura « accrochage », c'est-à-dire auto-oscillation, si la partie réelle de $E(0)$ est négative ou nulle : la condition d'accrochage s'écrit donc

$$\mathcal{R}(B_1 + B_2 + B_3 + B_4) = 0.$$

Supposons, pour simplifier, que $\delta = 0$, alors $B_2 + B_3 + B_4 \sim E_0$. Par ailleurs B_1 est donné par (32) et, par suite, l'accrochage a lieu lorsque p atteint une valeur telle que

$$\left|\frac{p}{2}\right|\left|\frac{E_s}{E_0}\right| e^{-\gamma l} = 1.$$

Or, le carré du module de $\frac{E_s}{E_0}$ représente le gain en puissance. En prenant les logarithmes des deux membres, il vient

$$(33) \qquad G - G_2 = 20 \log_{10} \frac{2}{|p|},$$

où G_2 est l'atténuation de la ligne de transmission, en décibels.

La résolution de cette équation (où G est une fonction connue de p) donne une valeur p_{max}, donc un gain maximum; c'est la valeur limite du gain d'un tube amplificateur à propagation d'onde lorsqu'on fait croître le courant, tous les autres paramètres tels que l'atténuation, la vitesse des électrons et la fréquence restant constants.

Il y a lieu de discuter l'équation (33) pour savoir s'il est avantageux ou non d'augmenter l'atténuation γ par unité de longueur de la ligne de transmission, ou bien encore d'augmenter sa longueur l pour avoir un gain maximum plus élevé.

En se reportant à la formule (31) du gain, l'équation (33) s'écrit

$$\frac{p}{2} kl\sqrt{3} - 2\gamma l - 1,1 = \log_e \frac{2}{p}.$$

Considérons (*fig.* 7) la courbe C d'équation $Y = \log_e \frac{2}{p}$ et les trois droites D_1, D_2 et Δ ayant respectivement pour équations

$$Y_1 = \frac{p}{2} kl\sqrt{3} - 2\gamma l - 1,1,$$

$$Y_2 = \frac{p}{2} kl\sqrt{3} - \gamma l - 1,1,$$

$$Y_\Delta = -1,1.$$

L'intersection A_1 de D_1 et de C donne p_{max}, et l'ordonnée du point A_2 de D_2 qui se trouve sur la même verticale que A_1 est $\frac{G_{max}}{8,68}$. D_1 et D_2 sont parallèles et leur pente est proportionnelle à kl;

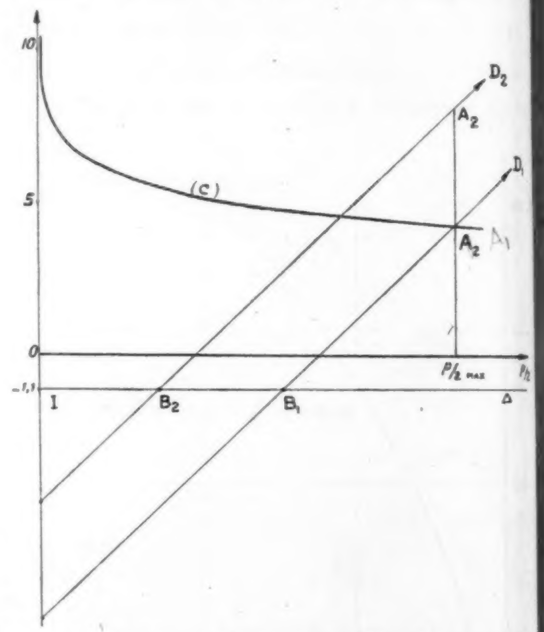


Fig. 7. — Discussion du gain limite.

elles coupent Δ en B_1 et B_2 tels que $I B_2 = B_2 B_1$, cette distance étant proportionnelle au coefficient d'atténuation γ de la ligne de transmission.

Il est aisé de voir qu'à longueur l de la ligne de transmission constante (D_1 et D_2 se déplacent parallèlement à elle-même), plus γ est grand, plus p_{max} est élevé (c'est-à-dire plus le courant du faisceau peut être élevé) et plus le gain maximum correspondant est élevé. Mais cet accroissement du G_{max} par augmentation de γ est d'autant plus faible que A_1 se trouve sur la partie rapidement ascendante de la courbe C, c'est-à-dire que la longueur de la ligne est telle que p_{max} soit inférieure à 10^{-3} par exemple.

Par contre à facteur d'atténuation γ constant, plus la longueur l augmente (D_1 et D_2 pivotent

[1] Ceci résulte d'une hypothèse faite continûment au cours de la présente étude, à savoir que la ligne de transmission est fermée à chaque extrémité sur son impédance caractéristique. Il est vraisemblable qu'une telle adaptation du générateur à ses circuits d'entrée et de sortie conduise à un fonctionnement optimum quant au rendement et, à la bande passante.

autour de B_1 et de B_2), plus G_{max} est élevé, mais plus p_{max}, et, par suite, le courant maximum, sont faibles.

Ainsi, pour le tube de J. R. Pierce pris comme exemple numérique et où $l = 30$ cm et γl correspond à 33 db, le gain maximum théorique est de 64 db, avec un courant tel que $p = 5.10^{-2}$, soit $\alpha = \frac{Z}{2Z_0} = 2,6.10^{-4}$. Avec $l = 30$ cm et une atténuation dix fois plus faible en décibels, on aurait $G_{max} = 40$ db avec $p = 2,55.10^{-2}$, soit $\alpha = 3,3.10^{-5}$, c'est-à-dire les 2/3 du gain avec un courant huit fois plus faible. Tandis qu'avec $l = 60$ cm et une atténuation de 6,6 db, on aurait un gain maximum de 49 db avec $p = 1,53.10^{-2}$ ou $\alpha = 7,2.10^{-6}$, c'est-à-dire qu'avec une ligne de transmission deux fois plus longue que la précédente, on aurait un gain maximum légèrement supérieur, mais un courant 4,5 fois plus faible.

Influence de la vitesse des électrons. — Pour voir l'influence de la vitesse relative des électrons par rapport à la vitesse de phase de l'onde libre, il y aurait lieu de discuter plus complètement que nous ne l'avons fait au paragraphe IV les racines de l'équation caractéristique (18) en fonction de δ. Notons simplement que dans le cas où Z est réel et $\delta > 0$, le mécanisme de l'amplification ne peut commencer que si $\alpha \geqq \left(\frac{2\delta}{3}\right)^3$, c'est-à-dire que si, partant d'un réglage correspondant à une vitesse $v_0 = v$ des électrons et à une certaine valeur de courant, donc de p, on augmente la vitesse des électrons, le gain tombe à zéro dès que δ atteint une valeur inférieure à $\frac{3p}{2^{\frac{2}{3}}}$, d'où

$$\delta_{max} < 1,85p \qquad \text{si} \quad \delta > 0.$$

Pour le tube choisi à titre d'exemple numérique, si le réglage pour $v = v_0$ correspond au maximum de gain théorique, $p = 5.10^{-2}$ et $\delta_{max} < 9,3.10^{-2}$, c'est-à-dire que le gain chute de 64 db si la tension de fonctionnement passe de 1670 V à une valeur inférieure à 1950 V.

VIII. Largeur de bande.

Quand la fréquence de l'excitation E_0 varie, le gain varie : la bande passante de l'amplificateur à propagation d'onde est la variation de fréquence qui correspond à une variation de gain de 3 db. Nous distinguerons la « bande passante électronique » des T. P. O. définie par la variation Δf de fréquence correspondant à $\Delta G = 3$ db à ***amplitude E_0 de l'excitation constante***, de la bande passante du tube associé avec son circuit d'entrée où E_0 peut varier bien que l'excitation ***du circuit d'entrée*** reste constante; si ce circuit est dimensionné convenablement, la bande passante du T. P. O. peut être notablement supérieure à sa bande passante électronique, mais c'est seulement cette dernière, qui est liée au mécanisme même de l'amplification d'une onde par un courant électronique, que nous étudierons maintenant.

Supposons, pour simplifier que l'impédance de couplage Z soit réelle, que la vitesse des électrons soit égale à la vitesse de phase de l'onde libre pour la fréquence moyenne, et qu'enfin cette vitesse de phase varie suffisamment peu avec la fréquence pour que la formule (31) du gain reste valable dans le domaine de variation de la fréquence. Alors dans l'expression du gain seul G_1 dépend de la fréquence par l'intermédiaire de pk, et l'on doit rechercher la variation de fréquence $\Delta f = \frac{\Delta\omega}{2\pi}$ telle que $G_1 = 3$ db.

On trouve aisément

$$2\pi\,\Delta f = \frac{3}{8,68\,l\,\frac{\sqrt{3}}{2}}\left[\frac{d\omega}{d(pk)}\right]_{\omega=\omega_0}$$

ou encore, comme $p = \left(\frac{Z}{4Z_0}\right)^{\frac{1}{3}}$

$$2\pi\,\Delta f = \frac{3}{8,68\,l\,\frac{\sqrt{3}}{2}}(4Z_0)^{\frac{1}{3}}\left[\frac{d\omega}{d\left(kZ^{\frac{1}{3}}\right)}\right]_{\omega=\omega_0}.$$

Ainsi la bande passante électronique est d'autant plus faible que la longueur l de la ligne de transmission ou le courant σi_0 du faisceau sont plus élevés. Elle dépend évidemment de la nature de la ligne de transmission, caractérisée par l'impédance Z. Dans le cas particulier où cette ligne est constituée par un guide d'ondes rempli de diélectrique, nous montrerons dans l'Annexe [formule A (11)], que Z est de la forme

$$Z = C^3 v^3 \omega^{-4},$$

où C est une constante, d'où

$$kZ^{\frac{1}{3}} = C\omega^{-\frac{1}{3}}$$

et la largeur de bande relative peut s'écrire

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta\omega}{\omega} = \frac{3}{8,68\,kl\,\frac{\sqrt{3}}{2}}\left[\frac{-3(4Z_0)^{\frac{1}{3}}}{C v \omega^{-\frac{4}{3}}}\right] = \frac{-9}{8,68\,pkl\,\frac{\sqrt{3}}{2}}$$

ou encore, d'après (31)

$$\left|\frac{\Delta\omega}{\omega}\right| = \frac{9}{G_1} = \frac{9}{G + G_2 + G_3},$$

où G, G_1, G_2 et G_3 sont exprimés en décibels.

IX. Conclusion.

Le résultat de l'interaction entre un faisceau électronique et un champ électrique longitudinal circulant à une vitesse voisine est une onde qui se propage en se déformant et que l'on peut décomposer en quatre composantes dont une seule, pratiquement, subsiste à la sortie : celle-ci se propage dans le sens du mouvement des électrons et son amplitude croît exponentiellement. Du côté de l'entrée par contre, la superposition de ces quatre composantes peut annuler l'excitation si le gain est trop élevé et provoquer l'accrochage du tube, tout comme dans un amplificateur à réaction.

Le gain des tubes à propagation d'onde est d'autant plus élevé que la longueur du tube est grande et le courant du faisceau plus intense. Il est assez sensible à la vitesse relative des électrons par rapport à celle de l'onde se propageant librement dans le circuit, et est maximum quand ces deux vitesses sont à peu près égales. De toute évidence les gains réels des T. P. O. doivent être inférieurs au gain théorique que nous avons calculé par suite, en particulier, des irrégularités accidentelles dans la ligne de transmission provoquant des réflexions locales d'ondes et des déphasages entre les ondes et le courant.

L'atténuation du circuit joue un rôle important. Outre qu'elle permet d'obtention de gains plus élevés par injection de courants électroniques plus intenses, elle diminue les risques d'accrochage par propagation vers l'entrée d'ondes réfléchies, et facilite l'adaptation du tube à ses circuits d'entrée et de sortie.

La bande passante des T. P. O., tout comme dans un amplificateur à résistance, décroît lorsque le gain augmente, soit par augmentation de la longueur du tube, soit, plus encore, par augmentation du courant, mais elle reste néanmoins très large (plusieurs centaines de mégacycles par seconde pour des fréquences de l'ordre de 3000 Mc/sec et un gain de 200 en puissance), et peut être accrue notablement par un dimensionnement convenable du circuit d'entrée.

L'analyse du fonctionnement des tubes à propagation d'onde qui a été esquissée ici, bien que reposant sur l'image d'un ligne à mode de transmission unique, peut être généralisée, ainsi qu'il est indiqué en annexe, dans le cas de lignes à modes de transmissions multiples, tels que des guides d'ondes : les principaux résultats de l'analyse restent pratiquement les mêmes lorsque les dimensions de ces guides sont telles qu'une seule onde puisse se propager normalement, les autres étant coupées.

De la présente étude il se dégage une certaine analogie entre les T. P. O. et une cascade de triodes amplificatrices à résistance, couplées entre elles par une ligne de transmission ainsi qu'il est représenté en figure 8. Cette ligne étant fermée à chaque

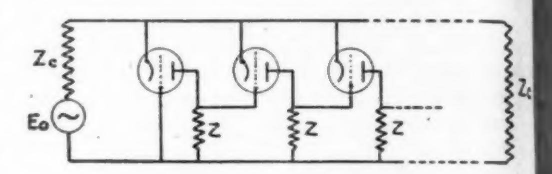


Fig. 8. — Analogie entre un T. P. O. et une cascade de triodes amplificatrices à résistance, couplées par une ligne de transmission.

extrémité sur son impédance caractéristique constitue un circuit apériodique. Il est bien évident que le gain augmente d'autant plus que le nombre de cellules augmente (G croît avec l), ou que le pouvoir amplificateur de chaque cellule augmente (G croît avec i_0 et avec Z). Dans le cas particulier où la ligne est à modes de transmission multiples comme dans un guide d'ondes rempli de diélectrique, les calculs développés en annexe montrent que les impédances Z du schéma de la figure 8 sont des résistances pures auxquelles viennent s'ajouter en série de petites capacitances qui croissent avec le gain de chaque élément.

ANNEXE.

Étude des tubes a propagation d'onde dont la ligne de transmission est constituée par un guide.

1. Excitation des ondes dans un guide par un faisceau électronique longitudinal.

Le champ électrique $\mathbf{E}e^{j\omega t}$ excité dans un milieu quelconque (ε, μ, χ) par un courant de convection $\mathbf{i}^{j\omega t}$ satisfait l'équation de Maxwell

$$\operatorname{rot}\operatorname{rot}\mathbf{E} - K^2\mathbf{E} = -j\omega\frac{4\pi\mu}{c^2}\mathbf{i}$$

avec

$$(A.1)\qquad K^2 = \frac{\varepsilon\mu}{c^2}\omega^2 + j\,\frac{4\pi\mu\chi\omega}{c^2}\qquad \text{(unités de Gauss, C.G.S.)}.$$

Cette équation est la généralisation de la deuxième équation (11) du texte. On peut la résoudre aisément si l'on connaît les modes normaux de propagation des champs dans la ligne de transmission, c'est-à-dire les solutions de l'équation sans deuxième membre satisfaisant à certaines conditions aux limites : c'est cette résolution que nous allons effectuer dans le cas où la ligne de transmission est constituée par un guide d'ondes. Nous supposerons que le guide d'ondes est rempli d'un diélectrique de constante suffisamment élevée pour réduire la vitesse de phase à une valeur voisine de la vitesse des électrons; nous supposerons en outre que le diélectrique est percé d'un petit canal pour permettre le passage du faisceau d'électrons et que ce petit canal n'apporte pratiquement pas de perturbation dans la répartition des champs.

On sait que les modes normaux de propagation des ondes dans un guide sont de deux types : les modes du type électrique où le champ électrique possède une composante dans la direction de l'axe du guide et les modes du type magnétique où le champ électrique n'a pas de composante selon l'axe. Puisque le faisceau d'électrons est rectiligne et dirigé selon l'axe du guide, celui-ci ne peut interagir qu'avec les ondes du type électrique.

Soit $\mathbf{u}$ le vecteur unitaire dirigé selon l'axe du guide. On peut exprimer (*cf.* par exemple [4]) les modes normaux de propagation du type électrique à l'aide d'une fonction réelle Φ à deux variables définie dans la section droite Σ du guide et satisfaisant à l'équation $\Delta\Phi + \alpha^2\Phi = 0$ et à la condition aux limites $\Phi = 0$ sur le contour de Σ : cette condition détermine une suite de valeurs propres réelles α_m à chacune desquelles est attachée une fonction propre Φ_m satisfaisant aux relations d'orthogonalité

$$\iint_\Sigma \Phi_m \Phi_p\,d\sigma = \begin{cases} 0 & \text{si}\quad m \neq p, \\ N_p^2 & \text{si}\quad m = p; \end{cases}$$

$$\iint_\Sigma \operatorname{grad}\Phi_m.\operatorname{grad}\Phi_p\,d\sigma = \begin{cases} 0 & \text{si}\quad m \neq p, \\ \alpha_p^2 N_p^2 & \text{si}\quad m = p. \end{cases}$$

Par ailleurs, à chaque nombre propre α_m correspond une constante de propagation β_m (¹) par

$$(A.2)\qquad \beta_m^2 = \alpha_m^2 - K^2$$

(¹) Le β ainsi défini correspond au β du paragraphe II.

et les deux ondes normales

$$(A.3)\qquad \mathbf{E}_m = [\alpha_m^2 \Phi_m \mathbf{u} \pm \beta_m \operatorname{grad}\Phi_m]\,e^{\pm\beta_m z} :$$

l'une, relative au signe —, se propage vers la droite, tandis que l'autre, relative au signe +, se propage vers la gauche.

Convenons d'appeler $\mathbf{F}_m$ le vecteur défini par le crochet de la relation précédente avec le signe — et $\mathbf{F}_{-m}$ le même crochet avec + : la solution de l'équation (A.1) dans laquelle $\mathbf{i} = Ae^{\Gamma z}\,\mathbf{u}$ (§ III) sera de la forme

$$(A.4)\qquad \mathbf{E} = \left(\sum_{m=-\infty}^{+\infty} q_m \mathbf{F}_m\right) e^{\Gamma z}.$$

Les coefficients q_m seront obtenus par substitution de (A.4) dans (A.1). On constate alors que le premier membre de (A.1) est la somme d'un vecteur dirigé selon $\mathbf{u}$ et d'un vecteur perpendiculaire à $\mathbf{u}$, tandis que le deuxième membre est un vecteur dirigé selon $\mathbf{u}$.

Par décomposition on obtient les deux équations

$$\sum_{-\infty}^{+\infty} q_m[\alpha_m^2 + \beta_m\Gamma + K^2]\alpha_m^2\Phi_m = -j\omega\frac{4\pi\mu}{c^2}A,$$

$$\sum_{-\infty}^{+\infty} q_m[\alpha_m^2\Gamma + \beta_m(\Gamma^2 + K^2)]\operatorname{grad}\Phi_m = 0.$$

Pour isoler les coefficients q_p, multiplions la première équation par Φ_p, la deuxième par grad Φ_p, et intégrons dans la section droite Σ. Par suite des relations d'orthogonalité entre les Φ_m, il vient

$$(A.5)\qquad \begin{cases} (\alpha_p^2 - K^2)(q_p + q_{-p}) + \beta_p\Gamma(q_p - q_{-p}) \\ \qquad = -j\omega\dfrac{4\pi\mu}{c^2}\,\dfrac{1}{\alpha_p^2 N_p^2}\displaystyle\iint_\Sigma A\,\Phi_p\,d\sigma, \\ \alpha_p^2\Gamma(q_p + q_{-p}) + \beta_p(\Gamma^2 + K^2)(q_p - q_{-p}) = 0. \end{cases}$$

De ces deux équations on tire aisément la valeur des coefficients q_p, donc la solution de l'équation de Maxwell (A.1) sous la forme (A.4).

Pour notre étude sur les tubes à propagation d'onde, nous nous intéressons plus particulièrement à la composante E_z du champ sur l'axe du guide le long duquel se propage le faisceau : cette composante a pour valeur

$$E_z = e^{\Gamma z}\sum_1^\infty \alpha_m^2(q_m + q_{-m})\Phi_m(0),$$

ou encore

$$(A.6)\qquad E_z = j\omega\frac{4\pi\mu}{c^2}\,\frac{K^2 + \Gamma^2}{K^2}\left(\sum_1^\infty \frac{1}{\Gamma^2 - \beta_m^2}\,\frac{\Phi_m^2(0)}{N_m^2}\right)\sigma i.$$

Cette relation entre le champ E_z excité et le courant σi est la généralisation de la relation (15) du paragraphe III; $\frac{E_z}{\sigma i}$ est l'impédance du circuit par unité de longueur présentée au faisceau pour l'onde Γ.

2. Équation caractéristique.

L'équation (6) du paragraphe I nous donne, sous forme différentielle, la composante alternative du courant créé au sein du faisceau par un champ longitudinal E_z : on en déduit

$$\text{(A. 7)} \qquad \sigma i = j \frac{k_0}{2 Z_0} \frac{1}{(\Gamma + j k_0)^2} E_z,$$

d'où la valeur de l'impédance du faisceau par unité de longueur présentée au circuit pour la composante Γ de l'onde.

En égalant cette impédance avec celle définie par (A.6), on obtient l'équation caractéristique, généralisation de l'équation (14) du paragraphe III dont les racines donnent les Γ des ondes excitées.

Cette équation est

$$\text{(A. 8)} \quad (\Gamma + j k_0)^2 = -\frac{2\pi\mu\omega k_0}{Z_0} \frac{K^2 + \Gamma^2}{K^2} \left[\sum_1^{\infty} \frac{1}{\Gamma^2 - \beta_m^2} \frac{\Phi_m^2(0)}{N_m^2} \right].$$

Elle n'est plus du quatrième degré comme au paragraphe III, mais possède au contraire une infinité de racines, c'est-à-dire qu'il y a une infinité d'ondes excitées; néanmoins, selon que jk_0 est voisin de telle ou telle constante de propagation des ondes libres, c'est telle ou telle de ces ondes qui est particulièrement excitée. Mais une discussion complète de cette équation dépasserait le cadre de cette Annexe.

3. Impédance de couplage Z du faisceau électronique et du guide d'ondes.

Dans notre étude, nous avions introduit au paragraphe III une impédance de couplage Z et, la composante E_z vérifiant la deuxième des équations (11), on avait

$$\text{(A. 9)} \qquad E_z = \frac{\beta k^2}{\Gamma^2 - \beta^2} Z \sigma i.$$

La comparaison de (A.6) et de (A.9) va nous permettre d'évaluer Z. Nous supposerons que l'onde libre unique se propageant sur la ligne de transmission considérée au paragraphe II avec la constante β corresponde à la vibration selon le mode fondamental du guide, c'est-à-dire que $\beta = \beta_1$.

Alors, étant donné que $\beta_1^2 = \alpha_1^2 - K^2$, on obtient par identification

$$\text{(A. 10)} \quad Z = j \frac{4\pi\mu\omega}{c^2 \beta_1 k^2} \frac{\alpha_1^2 + \Gamma^2 - \beta_1^2}{k^2} \frac{\Phi_1^2(0)}{N_1^2} \times \left[1 + (\Gamma^2 - \beta_1^2) \sum_2^{\infty} \frac{1}{\Gamma^2 - \beta_m^2} \frac{\Phi_m^2(0)}{\Phi_1^2(0)} \frac{N_1^2}{N_m^2} \right].$$

Γ^2 étant très voisin de β_1^2, on peut, *en première approximation*, négliger $\Gamma^2 - \beta_1^2$; si de plus on néglige l'atténuation due à la conductivité χ du diélectrique, $\beta_1 = jk$, K^2 est réel et Z *est réel et positif et représente une résistance pure*. En remarquant que $k = \frac{\omega}{v}$ où v est la vitesse de propagation de l'onde fondamentale, cette impédance peut encore s'écrire

$$\text{(A. 11)} \quad Z \sim Z' = \frac{120\pi}{\varepsilon} \left(\frac{v}{c}\right)^3 \left(\frac{\omega}{c}\right)^{-1} \frac{\alpha_1^2 \Phi_1^2(0)}{N_1^2} \quad \text{ohms}.$$

Si l'on tient compte du fait que Γ^2 est légèrement différent de β_1^2, on voit apparaître dans Z une légère réactance capacitive. En effet, d'après le Tableau I du paragraphe IV, on constate que

$$\Gamma \sim -\beta + pk \sin\theta,$$

d'où

$$\Gamma^2 - \beta^2 \sim -2jpk^2 \sin\theta.$$

Dans la somme du deuxième membre de (A.13) on peut remplacer par contre Γ^2 par β_1^2, et comme

$$\beta_1^2 - \beta_m^2 = \alpha_1^2 - \alpha_m^2,$$

il vient

$$\text{(A. 12)} \quad Z \sim Z' \left(1 - 2jp \frac{k^2}{\alpha_1^2} \sin\theta\right) \times \left[1 + 2jpk^2 \cos\theta \sum_2^{\infty} \frac{1}{\alpha_m^2 - \alpha_1^2} \frac{\Phi_m^2(0)}{\Phi_1^2(0)} \frac{N_1^2}{N_m^2} \right].$$

Ainsi Z peut être considéré comme réel tant que

$$\text{(A. 13)} \qquad 2pk^2 \sin\theta < \alpha_1^2.$$

La petite partie réactive qui s'introduit dans Z croît avec $p \sin\theta$, donc avec le courant ou le gain par unité de longueur du tube; ce phénomène conduit à une limitation du gain des T. P. O. d'une origine différente de celle étudiée au paragraphe VII.

4. Cas du guide d'ondes cylindrique.

A titre d'exemple supposons que le guide d'ondes soit un cylindre de rayon R et que la substance diélectrique dont il est rempli soit percée d'un petit canal de diamètre négligeable selon son axe pour laisser passer le faisceau électronique. Alors Φ_m est la fonction de Bessel $J_0(\alpha_m \rho)$ où $\alpha_m = \frac{\nu_m}{R}$; ν_m étant le $m^{\text{ième}}$ zéro de $J_0(x)$. Par suite $\Phi_m(0) = 1$, $N_m^2 = \pi R^2 J_1^2(\nu_m)$ et

$$Z' = \frac{2560}{\varepsilon R^4}\left(\frac{v}{c}\right)^3\left(\frac{\omega}{c}\right)^{-4} \text{ ohms} \tag{A.14}$$

avec

$$\frac{v^2}{c^2} = \frac{1}{\varepsilon\mu - \frac{5,8\,c^2}{\omega^2 R^2}}.$$

BIBLIOGRAPHIE.

[1] J. R. PIERCE, *The beam Traveling-wave tube* (*Bell Laboratories Record*, XXIV, n° 12, décembre 1946, p. 439-442).

[2] R. KOMPFNER, *The Travelling wave tubes* (*Wireless World*, novembre 1946).

[3] R. WARNECKE, *Sur quelques réalisations modernes et sur quelques conceptions récentes de tubes électroniques pour l'émission et la réception des ondes électromagnétiques ultra-courtes* [*Bulletin S. F. E.* (sous presse)].

[4] J. BERNIER, *Sur les cavités électromagnétiques* (*L'Onde électrique*, août-septembre 1946, p. 305-317).

INFORMATIONS.

25 ANS DE RADIODIFFUSION.

Le mois de novembre 1946 a été marqué par un anniversaire d'une importance que nous ne pouvons manquer de souligner.

C'est en effet le 26 novembre 1921 que la Société Française Radioélectrique a réalisé en France la première radiodiffusion d'un concert susceptible d'être entendu par le grand public.

Cette innovation sensationnelle s'est produite dans des conditions qui lui ont donné un éclat tout particulier et en ont fait un événement d'un lustre exceptionnel.

Déjà au cours de la même année la S. F. R. avait fait un premier essai qui était une expérience de laboratoire plutôt qu'une démonstration publique.

En effet, le 26 juin 1921, avait eu lieu une première émission musicale par T. S. F. C'est au cours d'une matinée artistique organisée au profit du professeur Branly à la Salle des Ingénieurs civils, 19, rue Blanche, que l'on put entendre cette transmission.

Mais les moyens utilisés étaient plutôt rudimentaires. A l'émission, on faisait tourner un phonographe devant un microphone muni d'un cornet qui recueillait les ondes musicales émises par le phonographe. Le courant microphonique était transmis par un petit émetteur d'avion, type DC 4. L'ensemble était installé dans l'usine S. F. R. de Suresnes.

La réception faite dans la Salle de la rue Blanche montrait la possibilité de transmettre de la musique par T. S. F., mais ne pouvait être appréciée que comme une simple démonstration à l'usage de spécialistes.

Néanmoins ce premier résultat était encourageant et les efforts des techniciens de la S. F. R. se portèrent sur la recherche de solutions plus acceptables pour un public plus étendu. Ces efforts devaient recevoir une consécration triomphale au cours de la manifestation du 26 novembre 1921.

Ce soir là en effet avait lieu à l'Hôtel Lutetia, boulevard Raspail, à Paris, un grand banquet donné à l'occasion du Centenaire des travaux d'Ampère, par l'Association des Ingénieurs de l'École Supérieure d'Électricité.

A ce banquet, présidé par M. Paul Laffont, Sous-Secrétaire d'État des Postes et Télégraphes, avait été invitée l'élite de la Science électrique française et de la Science électrique mondiale représentée par les membres du Congrès international des Grands Réseaux de transport d'énergie électrique qui se tenait à Paris à ce moment-là.

A la fin du banquet, M. Cellerier, Directeur du Laboratoire du Conservatoire des Arts et Métiers, Président de la Société Amicale des Ingénieurs de l'École Supérieure d'Électricité, prononça un discours au cours duquel il annonça en ces termes l'expérience dont les assistants allaient avoir la primeur :

« Je vous invite à écouter la très spirituelle Ballade du Millième adhérent, composée par M. Charles Alphand, et l'ode à la Fée Électricité qui vont vous être contées.

Ensuite la Fée Électricité elle-même, de la nouvelle station radioélectrique de Sainte-Assise près de Melun, fera entendre ses chants harmonieux, transmis jusqu'à vous par ses ondes mystérieuses. Et ainsi sera consacrée aujourd'hui, pour la première fois en France, cette double réalisation de téléphonie sans fil due au génie de nos savants français, de la *transmission directe*, à travers l'espace, de la voix humaine et des airs musicaux, et de la *réception simultanée* pour un grand nombre d'auditeurs ».

Après la ballade du millième membre adhérent, M. Charles Boyer, du théâtre Antoine, dont la voix a été depuis rendue familière à un immense public par le truchement du cinéma, prononça une allocution qui se terminait par ces mots :

« Messieurs, la Fée Électricité est une personne éthérée qui ne saurait, malgré son désir, lever son verre à votre santé. Subtile, pour s'en excuser,

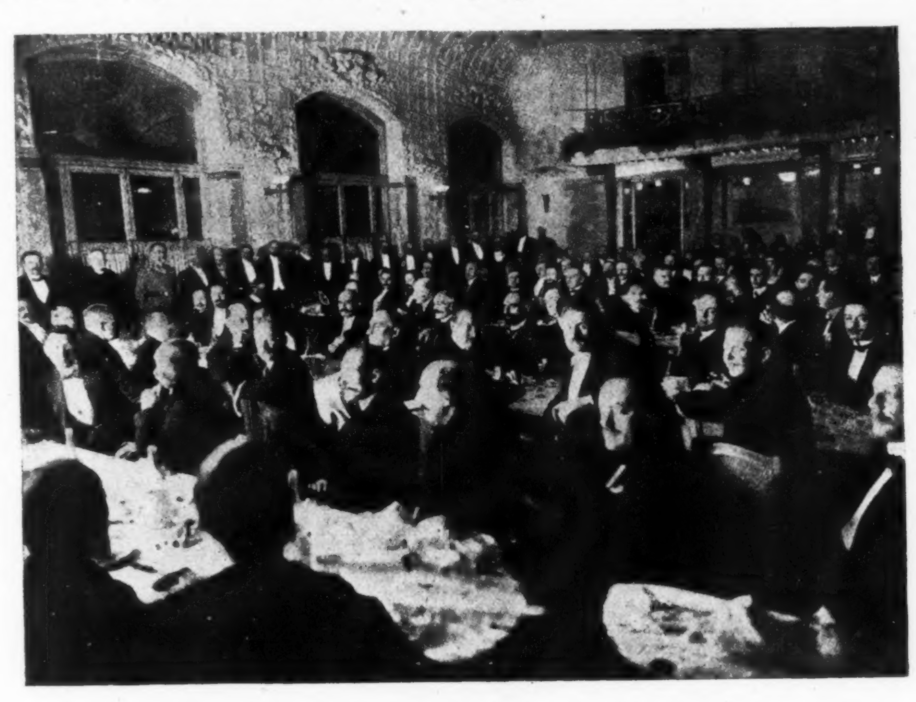
elle vous ménage une surprise : de son dernier palais, le grand centre de télégraphie de Sainte-Assise, des ondes vont s'envoler jusqu'à vous, et ces ondes, en votre honneur, en l'honneur de la science électrique française, en l'honneur de son illustre fondateur, vont vibrer, toutes modulées d'harmonie.

« Cette musique, Messieurs, sera la voix de votre amie, la Fée, une voix qui vous dit à tous *merci*. »

Après ce préambule destiné à préparer l'auditoire, le Ministre se leva pour donner la parole à la Fée Électricité.

On entendit alors une voix claire chanter un air du Barbier de Séville, puis la valse de Mireille.

C'était Mlle Yvonne Brothier, de l'Opéra-Comique, chantant à Sainte-Assise, et dont la voix était entendue avec une netteté et une puissance qui plongèrent l'assistance dans l'admiration.



Les invités des Ingénieurs de l'École Supérieure d'Électricité s'apprêtent, le 26 novembre 1921, dans la Salle des Fêtes de l'Hôtel Lutetia, à écouter la première émission de Radiodiffusion.

Puis, brusquement, les accents de la *Marseillaise* remplirent la salle.

Le Ministre et les auditeurs se levèrent d'un seul élan, rendant un hommage recueilli et enthousiaste à la manifestation artistique et scientifique à laquelle ils venaient d'assister.

Dès que la Marseillaise fut achevée, un écran cinématographique s'éclaira et les invités virent apparaître devant eux le poste de Sainte-Assise et la reproduction d'une répétition de la scène dont ils avaient entendu la transmission.

M. Paul Laffont, Ministre des Postes, Télégraphes et Téléphones, avant de lever la séance, prononça un dernier discours au cours duquel il exprima ses remerciements en ces termes :

« Je suis donc venu tout de même, et je n'a eu qu'à m'en louer, d'abord à cause de l'accueil charmant que vous m'avez réservé et ensuite à cause des choses merveilleuses que j'ai entendues ce soir. Nous les devons à l'initiative de votre président, M. Cellerier, mais aussi, ne l'oublions pas, à l'admirable technicien qu'est le Commandant Brenot.

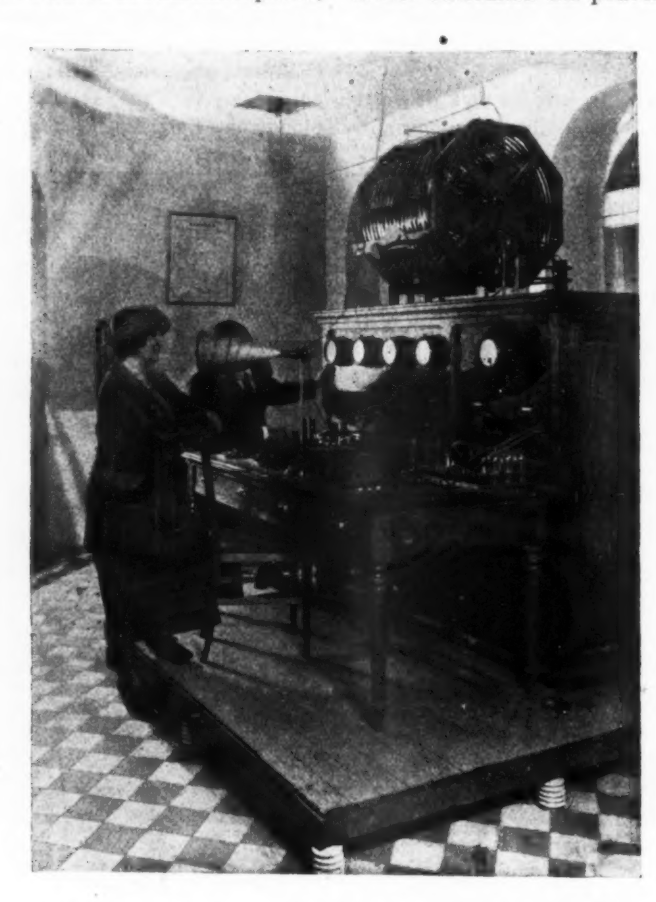
« Le Commandant Brenot a eu les initiatives les plus hardies et les plus heureuses. C'est grâce à lui, il faut le dire, que la France sera dotée demain d'un magnifique réseau de radiotélégraphie. »

Ainsi se trouvait consacrée officiellement avec un succès éclatant la première émission publique

de concert radiodiffusé faite en France, qui était en même temps la première radiodiffusion de ce genre effectué en Europe.

C'était exclusivement l'œuvre de l'industrie privée, faite par les techniciens de la Société Française Radioélectrique.

MM. Cellerier et Brenot en avaient eu l'idée pour attirer l'attention des pouvoirs publics d'une façon spectaculaire sur la nouvelle application de la science qui leur paraissait avoir un avenir sensationnel. Ils trouvèrent en M. Paul Laffont un homme d'État à l'esprit largement ouvert, curieux du Progrès, qui leur donna tout son appui.



Mademoiselle Yvonne Brothier, de l'Opéra-Comique, à la Station de Sainte-Assise, va chanter le 26 novembre 1921 pour les auditeurs de l'Hôtel Lutetia, au cours de la première émission de Radiodiffusion.

La réalisation technique de la séance historique du 21 novembre était la suivante :

A l'émission, à Sainte-Assise, le Commandant Garnier, chef de centre, assisté de M. Reboux, l'ingénieur chargé de la mise au point suivant les directives de M. Chireix, disposait d'un poste émetteur SFR, type D 200, équipé de quatre lampes émettrices de 500 W chacune. La modulation était assurée par une lampe modulatrice agissant sur les lampes émettrices par le procédé de contrôle d'anode.

Les aériens étaient constitués par une antenne à trois fils supportée par un traversier tendu entre deux des pylônes de 250 m de la station transcontinentale. La puissance rayonnée par l'antenne était de 1,5 kW. La longueur d'onde était de 2400 m.

A la réception, à l'hôtel Lutetia, les ingénieurs chargés de l'installation, MM. Carbenay et Joly,

disposaient d'une petite antenne tendue sur le toit de l'immeuble et d'un récepteur SFR, type « Marine ». Après amplification dans un amplificateur à résonance à quatre lampes et dans un amplificateur microphonique, les sons étaient diffusés dans la salle du banquet par des haut-parleurs dissimulés derrière des plantes vertes.

Pour assurer une liaison téléphonique constante avec Sainte-Assise, les techniciens de l'hôtel Lutetia disposaient d'un poste radiotéléphonique, modèle aviation, DC 4, d'une puissance de 35 W qui permit d'assurer une liaison parfaite sur une longueur d'onde de 600 m.

Ainsi avec du matériel sorti d'usines françaises, les techniciens français étaient les premiers en Europe à présenter une émission de radiodiffusion ayant toutes les caractéristiques des émissions d'aujourd'hui.

Dès ce moment-là était démontrée d'une façon éclatante la possibilité d'effectuer des émissions régulières.

Il est regrettable que, par suite de controverses administratives et politiques, le statut de la Radiodiffusion n'ait pas été établi tout de suite.

C'est en novembre 1922 que le Sous-Secrétaire d'État aux P. T. T. accorda son autorisation aux premières émissions régulières faites par Radiola, devenu plus tard Radio-Paris. Mais ce poste n'était considéré que comme poste d'expérience, ses émissions comme des essais, et l'autorisation n'avait pu être accordée qu'à titre précaire et provisoire. Il fallait beaucoup de foi et de courage pour entreprendre, malgré l'incertitude du lendemain, l'organisation et le développement d'une semblable entreprise.

C'est ce qui fut fait néanmoins avec succès.

Mais combien plus efficaces auraient été les résultats si les pouvoirs publics, après M. Paul Laffont, avaient compris plus vite l'importance de la radiodiffusion et établi avec une large compréhension de l'avenir le statut qui pouvait en aider le développement.

Henry Porra.

TÉMOIGNAGE DE SATISFACTION DU « SIGNAL CORPS » AMÉRICAIN À LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE RADIOÉLECTRIQUE.

Nous sommes heureux de publier en fac-similé la lettre que le Brigadier général F. H. Lanahan a adressée à la Société Française Radioélectrique, ainsi que la réponse faite par le Colonel P. Brenot, Président-Directeur général de cette Société.

HEADQUARTERS
U. S. FORCES, EUROPEAN THEATER
Office of the Chief Signal Officer

APO 757
22 January 1947

Societe Francaise Radioelectrique
55 Rue Greffulhe
Levallois-Perret (Seine)

Gentlemen:

The excellent work your organization accomplished in supplying the Signal Corps of the United States Army with transmitting tubes and transmitters during the critical War months was a very important factor in the successful prosecution of the recent War against the Axis Powers.

It is indeed a personal pleasure to be able to extend this letter of commendation and to express the utmost appreciation on behalf of the Signal Corps for the efforts of your organization in aiding the United States Army.

Yours very truly,

F. H. LANAHAN, JR.
Brigadier General, USA
Chief Signal Officer

Messieurs,

Le travail excellent que votre Organisation a accompli en fournissant au « Signal Corps » de l'Armée des États-Unis des tubes d'émission et des émetteurs pendant les mois critiques de la guerre, fut un facteur très important dans la poursuite efficace de nos succès dans la dernière guerre contre les puissances de l'Axe.

Il m'est, en effet, un plaisir personnel d'être en mesure de vous adresser cette lettre de reconnaissance et vous exprimer la très haute appréciation de la part du « Signal Corps » pour les efforts que votre Organisation a faits pour aider l'Armée des États-Unis.

Veuillez agréer, Messieurs, mes salutations très distinguées.

SOCIÉTÉ FRANÇAISE RADIO-ÉLECTRIQUE

SOCIÉTÉ ANONYME AU CAPITAL DE 36 000.000 DE FRANCS

ADRESSE TÉLÉG TÉLONDE . PARIS
TÉLÉPHONE ANJOU 84-60

PARIS (8e) LE 31 Janvier 1947
79, BOULEVARD HAUSSMANN

Brigadier Général F.H. LANAHAN Jr
Chief Signal Officier
Headquarters U.S. Forces European Theater

A P O 757

Mon Général,

Votre lettre du 22 Janvier a été pour l'ensemble du personnel de notre Société, Directeurs, Ingénieurs, employés et ouvriers la plus belle récompense donnée aux efforts qu'ils effectuaient de tout coeur en vue de donner satisfaction aux besoins de votre Armée, dont l'action les a remplis d'admiration.

Tous auraient voulu que ces efforts soient encore plus efficaces, mais nous avons dû dans la même période consacrer une grande partie de nos activités à l'Armée française dont le matériel de transmission était à reconstituer.

Je me suis permis de porter votre lettre à la connaissance de l'ensemble de notre personnel ; je suis son interprète pour vous exprimer notre très vive reconnaissance pour la très haute marque d'estime donnée par le "Signal Corps" à notre Société.

Je vous prie de bien vouloir agréer, Mon Général, les assurances de ma très haute considération.

Colonel P. BRENOT
Président Directeur Général

PRIX DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES.

L'Académie des Sciences, dans sa séance du 16 décembre 1946, a attribué le prix Pierre Laffitte au titre de l'année 1946 à M. Jean Ortusi, du Laboratoire de Recherches physiques de la Compagnie Générale de Télégraphie sans fil, pour ses travaux sur la propagation des ondes hertziennes.

Imp. GAUTHIER-VILLARS
55, Quai des Grands-Augustins, PARIS
125398
Dépôt légal, 1947, n° 295.

